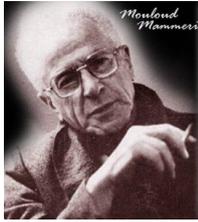


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie Électrique et d'Informatique  
Département d'Informatique



# Mémoire

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master 2

Systemes Informatiques

## Thème

*Optimisation du nombre de clusters  
dans les réseaux de capteurs sans fil.*

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>r</sup> TALBI Said**

**Réalisé et présenté par :**

**M<sup>elle</sup> TEBRI Badia**

**M<sup>elle</sup> HAMMID Nacera**

**Promotion 2013/2014**



# Remerciements

**N**ous tenons en premier lieu à remercier le bon Dieu de nous avoir donné la chance d'y exister, le courage et la patience pour réaliser ce projet.

*Nous remercions nos chers parents pour leur grand soutien.*

*Nous remercions notre promoteur Monsieur TALBI.S pour nous avoir encadré et donné la chance d'acquérir des connaissances dans le domaine des Réseaux de Capteurs Sans Fil, pour sa présence, sa motivation et son sens d'organisation.*

*Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous remercions vont à OUBABAS.S et à ceux et celles qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce travail.*

*A M<sup>r</sup> Talbi*

*« Tu donnes du poisson à un homme, il se nourrira une fois, si tu lui apprends à pêcher il se nourrira toute sa vie »*

*Kouen Tse*



## *Dédicaces*

*J*e dédie ce modeste travail à la mémoire de mon camarade Malik, que dieu bénisse son âme.

*A mes très chères parents Ali et Zohra, que dieu les bénisse.*

*A mes très chères sœurs Fatiha et Zouina, et frères Malik, Djemaa et Mouloud.*

*A ma très chère tante Dahbia « Babi ».*

*A ma très chère nièce Dacine-Amira*

*A DADA & DADACH.*

*A mes très chères copines Kahina, lea, Lycia et Amina*

*A Yuli.*

*A mes chers amis (es) Badia, Naima, Radia, Ahmed, Djamel, Mouloud et Rachid.*

*A tous mes camarades de la promotion 2013-2014.*



*Nacera*

## *Dédicaces*



*A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour*

*A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans mes moments les plus durs*

*Et ceux à qui je dois tant*

*A mes parents Rachid et Salihha pour leur amour et leur support affectif*

*A mon adorable frère Ferhat et mes très chères sœurs Mekioussa,  
Zoulikha, Meyassa*

*A mes grands-parents Amar et Mekioussa et Ghenima*

*A mes oncles et leurs familles*

*A ma chère tante Ouiza et son mari et mon cousin Rachid*

*A tous mes amis(e) : Liza et sa famille, Malika, Zahoua,  
Sofiane, Yacine.B, Ghilas*

*A mon binôme Nacera*

*Que ce travail soit le symbole de ma reconnaissance de leur amour infini*

*A votre bénédiction la plus sainte*

*Badia*



## Résumé

Les récents progrès dans les domaines de la microélectronique, et des réseaux sans fil ont donné naissance à des capteurs miniatures autonomes à des coûts raisonnables. Grâce à ces propriétés les nœuds capteurs peuvent être déployés même dans des zones hostiles ou risquées. Quand-bien-même, cette autonomie des capteurs ne dure pas longtemps. Ces derniers sont alimentés par des batteries non rechargeables et difficilement remplaçables.

Les communications sont les tâches les plus coûteuses en énergie. Elles doivent être réparties pour créer un équilibre dans la dissipation de cette dernière afin d'assurer une durée de vie de réseau plus longue.

L'auto-organisation en clusters est une approche qui regroupe les nœuds en clusters. Chaque cluster a un cluster chef (cluster head) qui s'occupe de la collecte des données capturées par les membres de son cluster, leur agrégation et l'envoi du résultat à la station de base.

Le nombre optimal de clusters économisant l'énergie est fixé par le protocole LEACH (**L**ow **E**nergy **A**daptative **C**lustering **H**ierarchy) à 5% des nœuds du réseau. Cette valeur étant empirique ne peut pas être valable que dans des conditions spécifiques.

L'objectif de ce travail est d'étudier quelques travaux qui proposent un moyen (formule) de calculer ce nombre optimal, et de comparer entre les résultats de simulation obtenus afin de déduire le nombre le plus optimal.

**Mot clés :** réseaux de capteurs sans fil, auto-organisation, le nombre optimal de clusters, clustering.

## **Abstract**

Recent advances in microelectronics and wireless networks have led to autonomous miniature sensors at reasonable costs. Thanks to these properties the sensor nodes can be deployed even in hostile or hazardous areas. However, the autonomy of these sensors doesn't last long. Those lasts are powered by non-rechargeable and difficult to replace batteries.

The communications are the most costly on energy, it must be distributed to create balance in the dissipation of this latter to ensure a life longer network.

Self-organization in clusters is an approach that divides nodes into clusters. Each cluster has a cluster head that is responsible for the collection captured data by the members of its cluster, aggregation and sending the result to the base station data.

The optimal number of clusters saving energy is determined by the protocol LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) to 5% of the network nodes. This value is empiric and may be not valid outside specific conditions.

The aim of this work is to study some works that propose means (formula) to calculate the optimal number and compare the simulation results to derive the most optimal number.

**Keywords:** wireless sensor network, self-organization, optimal number of clusters, clustering.

## Liste des acronymes

<b>ADC</b>	Analog to Digital Converter
<b>ADV</b>	cluster head ADVertissement.
<b>AMRP</b>	Average Minimum Reach Ability Power.
<b>BCDCP</b>	Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol.
<b>BLR</b>	Boucle Locale Radio
<b>CDMA</b>	CODE Division Multiplexed Access
<b>CDS-règle k</b>	Connected Dominating Set-règle k.
<b>CDS-IDS</b>	CDS Independent Dominating Set.
<b>CH</b>	Cluster Head
<b>CSMA</b>	Carrier Sense Multiple Access
<b>DEEP</b>	Distributed Energy Efficient clustering Protocol.
<b>EECS</b>	Energy Efficient Clustering Scheme
<b>GPRS</b>	General Packet Radio Service.
<b>GPS</b>	Global Positioning System.
<b>GSM</b>	Global System for Mobile Communication.
<b>HEED</b>	Hybrid Energy Efficient Distributed clustering.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>J-Sim</b>	Java-SIMultiator
<b>LEACH</b>	Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy

<b>LEACH-C</b>	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy Centralized
<b>LEACH-E</b>	clustering algorithm of cluster head optimization for WSN based energy.
<b>Legos</b>	Low Energy self-Organization Scheme
<b>LMST</b>	Local Minimum Spanning Tree.
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc Network
<b>M-LEACH</b>	Multi-hop LEACH.
<b>NAT</b>	Network Address Translation.
<b>NED</b>	Network Descriptor.
<b>NS-2</b>	Network Simulator 2
<b>OMNET ++</b>	Objective Modular Network Test-bed in C++
<b>OPNET</b>	Optimum Network Performance
<b>OSI</b>	Open Système Interconnexion.
<b>PDA</b>	Personal Digital Assistant
<b>P2P</b>	peer to peer.
<b>QoS</b>	Qualité De Service.
<b>RCSFs</b>	Réseaux De Capteurs Sans Fils.
<b>RNG</b>	Relative Neighborhood Graph.
<b>RRCH</b>	Round Robin Clustering Hierarchy
<b>RSF</b>	Réseau Sans Fil.

<b>SB</b>	Station de Base
<b>TDMA</b>	Time Division Multiplexed Access.
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication System.
<b>Wi-Fi</b>	Wireless-Fidelity.
<b>Wimax</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access.
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WMAN</b>	Wireless Metropolitan Area Network.
<b>WPAN</b>	Wireless Personal Area Network
<b>WSNs</b>	Wireless Sensor Networks.
<b>WWAN</b>	Wireless Wide Area Network.

## Liste des figures

Figure 1.1 : Classification des réseaux sans fil.....	2
Figure1.2 : Mode cellulaire (Ensemble de services de base).....	5
Figure1.3 : Mode sans infrastructure (ad-hoc).....	6
Figure1.4 : Architecture simplifiée d'un réseau de capteur .....	7
Figure1.5 : Anatomie d'un capteur.....	8
Figure1.6 : Architecture de localisation hybride .....	12
Figure1.7 : Arbre d'agrégation de données .....	16
Figure1.8 : Modèle en couches (pile protocolaire) d'une architecture de réseau de capteurs. .	19
Figure1.9 : Répartition de la consommation d'énergie dans d'un capteur .....	22
Figure1.10: Surveillance d'incendie et d'inondation.....	25
Figure1.11 : le flux d'information d'un patient.....	25
Figure1.12:Détection d'intrusion par un réseau de capteurs sans fil.....	26
Figure1.13:Suivi à la trace par un réseau de capteurs sans fil.....	27
Figure2.1 : Principe du protocole CDS-règle $k$ .....	34
Figure2.2 : Schéma illustrant le principe de l'algorithme CDS-IDS .....	36
Figure2.3 : Topologie LEGOS .....	37
Figure2.4 : Élagage des liens avec RNG.....	38
Figure2.5 : Algorithme de routage (LEACH).....	40
Figure2.6 : Opérations du la phase d'initialisation .....	42
Figure2.7 : Le mécanisme utilisé par EEUC.....	47
Figure2.8 : Construction d'une hiérarchie multi-niveaux avec TEEN et APTEEN.....	49
Figure2.9 :l'énergie consommée (LEACH, APTEEN et TEEN) .....	50
Figure2.10 : Hiérarchie de clusters.....	56
Figure3.1 : les phases d'un cycle en LEACH.....	75
Figure4.1: Architecture générale d'un nœud mobile dans NS-2.....	85
Figure4.2 : Architecture générale de J-Sim.....	87
Figure 4.3: Modules simples et composés.....	88
Figure4.4 : plateforme de simulation .....	91
Figure4.5 : Energie moyenne consommée par LEACH, LEACH-E, DEEP, LEACH-V.....	98
Figure4.7 : L'écart type de l'énergie consommée.....	99

## Liste des tableaux

Tableau1.1 : comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc.....	30
Tableau2.1 : comparaison entre les protocoles de clustering. ....	58
Tableau3.1 : l'énergie dissipée lors de la phase set-up.....	76
Tableau3.4 : comparaison entre les trois (3) articles.....	81
Tableau4.1 : Comparaison entre les simulateurs.....	89
Tableau4.2 : Moyenne d'énergie consommée.....	94
Tableau4.3: Ecart type de l'énergie consommée .....	95
Tableau4.4 : paramètres de simulation sous OMNET++.....	96

# Sommaire

<b>Liste des acronymes.....</b>	<b>III</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>IX</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Réseaux de capteurs sans fil.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction .....	1
1.2 Généralités sur les réseaux sans fil .....	1
1.2.1 Présentation .....	1
1.2.2 Classification des réseaux sans fil .....	2
1.2.3 Classification selon l'étendue géographique.....	3
1.2.4 Classification selon l'infrastructure .....	5
1.3 Présentation des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) .....	6
1.4 Architecture d'un RCSF.....	6
1.5 Anatomie d'un capteur.....	7
1.5.1 Unité de calcul.....	8
1.5.4 Batterie .....	9
1.6 Caractéristiques d'un RCSF .....	9
1.6.1 Déploiement dense et aléatoire.....	9
1.6.2 Topologie dynamique.....	10
1.6.3 Auto-organisation du réseau.....	10
1.6.4 Modèle de communication particulier.....	10
1.7 Contraintes d'un RCSF .....	10
1.7.1 Ressources limitées .....	11
1.7.2 Durée de vie limitée.....	11
1.7.3 Le routage.....	11
1.7.4 Localisation .....	11
1.7.5 Qualité de Service (QoS).....	13
1.7.6 La synchronisation temporelle .....	13
1.7.7 Gestion des ressources.....	13
1.7.8. Gestion des données collectées .....	15
1.7.9. Mise à l'échelle .....	16
1.7.10 Adressage .....	16
1.7.11 Organisation et le fonctionnement du réseau .....	17
1.7.12 Sécurité.....	18

1.8 Pile protocolaire dans les RCSFs .....	19
1.8.1 Couche physique .....	20
1.8.2 Couche liaison de données .....	20
1.8.3 Couche réseau.....	20
1.8.4 Couche transport.....	21
1.8.5 Couche application .....	21
1.8.6 Gestionnaire de la mobilité.....	21
1.8.7 Gestionnaire de l'énergie .....	21
1.8.8. Gestion de tâche .....	22
1.9 Consommation d'énergie dans les RCSF.....	22
1.10 Domaines d'application .....	23
1.10.1 Environnement .....	23
1.10.2 Médical .....	25
1.10.3 Habitat .....	26
1.10.4 Militaire .....	26
1.11 Quelques axes de recherche dans les RCSFs .....	27
1.11.1 Tolérance aux pannes .....	28
1.11.2 Sécurité.....	28
1.11.3 Routage.....	29
1.11.4 Auto-organisation .....	29
1.12 RCSFs versus ad-hoc.....	30
1.13 Conclusion.....	30
<b>Chapitre 2 : Auto-organisation dans les RCSFs.....</b>	<b>31</b>
2.1 Objectif.....	32
2.2 Auto-organisation basée sur la mise en place d'un CDS .....	32
2.2.1 CDS-règle k ( <i>Connecting Dominating Set règle-k</i> ).....	33
2.2.2 CDS-IDS ( <i>Connected Dominating Set-Independent Dominating Set</i> ).....	34
2.2.3 Legos ( <i>Low Energy Self-OrGanisatiOn Scheme</i> ).....	36
2.3 Auto-organisation basée sur l'élagage de liens.....	37
2.3.1 RNG ( <i>Relative Neighborhood Graph</i> ).....	38
2.3.2 LMST ( <i>Local Minimum Spanning Tree</i> ).....	38
2.4 Clustering .....	39
2.4.1 LEACH ( <i>Low Energy Adaptative Clustering Hierarchy</i> ) .....	39
2.4.2 HEED ( <i>Hybrid Energy Efficient Distributed clustering</i> ) .....	44
2.4.3 EECS ( <i>Energy Efficient Clustering Scheme</i> ).....	45
2.4.4 EEUC ( <i>An Energy-Efficient Unequal Clustering Mechanism for WSN</i> ).....	46

2.4.5 Le protocole de routage «TEEN et APTEEN».....	48
2.4.6 Le protocol LCH (Layered Clustering Hierarchy protocol).....	50
2.4.7 KOCA (K-hop Overlapping Clustering Algorithm).....	52
2.4.8 EEHC (Energy Efficient Hierarchical Clustering).....	54
2.4.9 HCC (Hierarchical Control Clustering).....	55
2.5 Synthèse .....	57
2.6 Conclusion.....	58
<b>Chapitre 3 : Nombre de clusters optimisant l'énergie.....</b>	<b>59</b>
3.1 Introduction .....	60
3.2 A Distributed Topology Management Protocol for Wireless Sensor Networks .....	60
3.2.1 Le fonctionnement de DEEP .....	60
3.2.2 Le calcul du nombre optimal par DEEP.....	61
3.2.3 Discussion .....	65
3.3 A Clustering Algorithm of Cluster-head Optimization for WSNs Based on Energy .....	66
3.3.1 Le modèle énergétique utilisé par LEACH-E.....	67
3.3.2 Calcul du nombre optimal par LEACH-E .....	68
3.3.3 La sélection du CH par LEACH-E .....	71
3.3.4 Les phases du protocole LEACH-E .....	72
3.3.5 Discussion .....	73
3.4 Novel Method for Optimal Number of Cluster Heads in LEACH.....	74
3.4.1 Le modèle radio et réseau.....	74
3.4.2 Le calcul de nombre optimal .....	75
3.4.3 Discussion .....	80
3.5 Conclusion.....	80
<b>Chapitre 4 : Evaluation des performances.....</b>	<b>83</b>
4.1 Objectifs .....	84
4.2 Simulation dans les RCSFs .....	84
4.3 Quelques simulateurs utilisés pour les RCSFs .....	84
4.3.1 Le Simulateur NS-2.....	85
4.3.2 Le simulateur OPNET .....	86
4.3.3 Le Simulateur J-Sim.....	86
4.3.4 Le Simulateur OMNET++.....	87
4.3.5 Choix de simulateurs .....	88
4.4 Modèle énergétique .....	91
4.4.1 Energie consommée pour une réception.....	92
4.4.2 Energie consommée pour une transmission .....	92

4.4.3 Energie consommée pour l'agrégation.....	93
4.5 Critères de performance. ....	93
4.5.1 Moyenne d'énergie consommée .....	93
4.5.2 Ecart type de l'énergie consommée .....	94
Ecart type de l'énergie consommée est obtenue par .....	94
4.6 Paramètres de simulation.....	95
4.7 Synthèse .....	99
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>101</b>
<b>Références .....</b>	<b>103</b>

## Introduction générale

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont des réseaux ad hoc généralement constitués d'entités autonomes miniaturisées appelés nœuds capteurs pouvant communiquer entre eux par liaison radio. Les RCSF ont suscité beaucoup d'engouement dans la recherche scientifique en raison notamment des nouveaux problèmes de routage sous forte contrainte de durée de vie du réseau et de faibles capacités des nœuds. Malgré la miniaturisation et la réduction du coût de fabrication, ces capteurs sont généralement dotés de ressources limitées en termes de puissance de transmission, de capacité de traitement et de stockage des données et d'énergie.

Les principaux problèmes dans les réseaux de capteurs sans fil ou les WSNs "Wireless Sensor Networks" sont le routage, l'énergie consommée par le nœud, la sécurité, l'agrégation de données, la mobilité imprévisible des nœuds, etc. Ces capteurs sont parfois déployés dans des zones hostiles. Il est donc nécessaire d'avoir une stratégie efficace qui prend en considération l'énergie du réseau pour augmenter sa durée de vie en réduisant la perte d'énergie tout en étant réactive aux changements de l'environnement.

Le routage est fondamental dans ce type de réseau car il n'existe pas d'infrastructure qui gère les informations échangées entre les différents nœuds du réseau (comme par exemple les routeurs dans les réseaux filaires). En effet, c'est à chaque nœud du réseau de jouer le rôle d'un routeur. Ainsi, tous les nœuds collaborent afin de router une information vers une certaine destination. ; Plusieurs solutions de routage hiérarchiques utilisent la technique du Clustering pour minimiser la consommation de l'énergie; à titre d'exemples : LEACH, HEED,...etc. qui utilisent une hiérarchisation sous forme de couches avec des Clusters à un saut, pour une livraison de données plus rapide.

L'objectif de notre travail, est d'étudier la véracité de quelques travaux qui définissent un modèle théorique pour le calcul du nombre optimal de cluster optimisant l'énergie. Pour se faire on a procédé par l'application de ces modèles sur la plateforme Omnet++ et en utilisant le protocole LEACH, et finir par déduire le modèle ayant le nombre le plus optimal(le plus économisant en énergie).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, présente l'état de l'art des réseaux sans fil et les RCSFs dans un contexte général, le deuxième chapitre, présente l'auto-organisation pour les RCSFs et les techniques principales de cette dernière ainsi que le clustering dans les RCSFs avec une description détaillée de quelques protocoles en indiquant leurs avantages et leurs inconvénients .Le troisième chapitre, présente une étude comparative entre trois articles proposant un modèle théorique calculant le nombre optimal de clusters. Le quatrième chapitre présente une étude comparative entre des différents simulateurs réseaux afin d'en choisir le mieux adapté à notre travail et présente l'analyse et la discussion des résultats de simulation. Notre travail se termine par une conclusion générale.

# **Chapitre 1 : Réseaux de capteurs sans fil**

## 1.1 Introduction

Les communications sans fil (RSF) ont un rôle crucial à jouer au sein des réseaux informatiques. Elles offrent des solutions ouvertes pour fournir de la mobilité ainsi que des services essentiels là où l'installation d'infrastructures n'est pas possible. Ces réseaux sont en plein développement du fait de leur flexibilité de leur interface, qui offre à un utilisateur la mobilité. Cette mobilité est le nouveau mode de communication utilisé. Elle engendre de nouvelles caractéristiques propres à l'environnement mobile: une fréquente déconnexion, un débit de communication modeste, et des sources d'énergie limitées.

Au cours de ces dernières décennies, la technologie des réseaux mobiles (réseaux sans fils) n'a cessé de se développer et a connu un attrait croissant pour un nouveau type de réseaux ad hoc (RSF sans infrastructure) : les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), ou Wireless Sensor Network (WSNs).

Les réseaux de capteurs sans fils (RCSFs) ont connu un grand essor grâce à la forte production des systèmes de taille extrêmement réduite et embarquant des unités de calcul et de communication sans fils de faible coût, fruits du progrès dans les domaines de la microélectronique et de l'informatique. Cette technologie, en plein développement, a promptement envahi plusieurs domaines d'application (militaire, environnemental, médical, industriel, etc.).

Nous introduisons ce chapitre sur les RCSFs par des généralités sur les réseaux sans fils. La suite du chapitre sera consacrée aux réseaux de capteurs sans fils, abordant les points essentiels ; de la définition aux axes de recherche des RCSFs. Nous clôturons ce chapitre par une comparaison entre les réseaux ad hoc et les réseaux de capteurs sans fil.

## 1.2 Généralités sur les réseaux sans fil

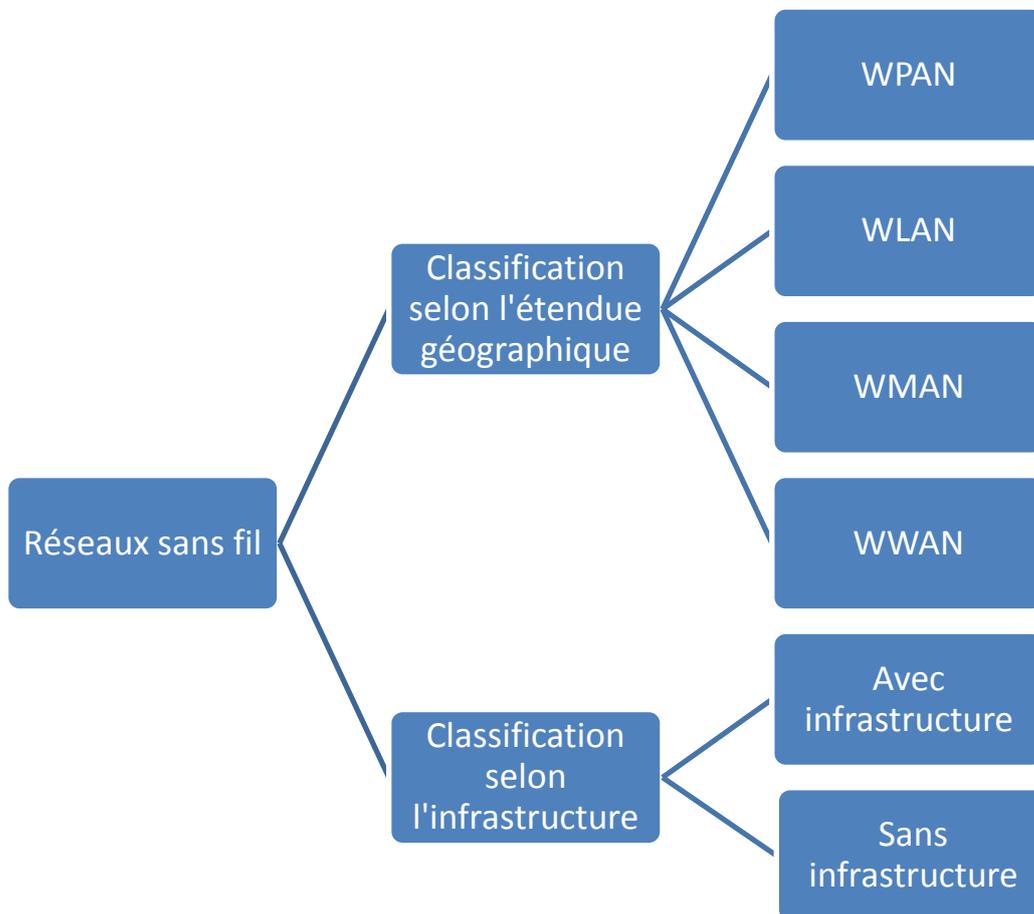
### 1.2.1 Présentation

Un réseau sans fil est un réseau informatique ou numérisé qui connecte différents postes ou systèmes entre eux par ondes radio. Il peut-être associé à un réseau de télécommunications pour réaliser des interconnexions entre nœuds. La norme la plus utilisée actuellement pour les réseaux sans fil est la norme IEEE802.11, mieux connue sous le nom de Wi-Fi. [PUJ 05].

Les RSFs sont caractérisés par la mobilité, une topologie dynamique et facilité de déploiement. Ils promettent de grands avantages en termes de flexibilité, du coût, d'autonomie et de robustesse.

Dans cette section, on va présenter la classification des RSFs selon l'étendu géographique (WPAN, WLAN, WMAN, WWAN) et l'infrastructure mise en place (avec ou sans infrastructure) [PUJ 05], [ZHE 04].

### 1.2.2 Classification des réseaux sans fil



**Figure 1.1** : Classification des réseaux sans fil.

### 1.2.3 Classification selon l'étendue géographique

#### WPAN (Wireless Personal Area Network)

Il concerne les réseaux sans fil d'une faible portée : de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Ce type de réseau sert généralement à relier des périphériques (imprimante, téléphone portable, appareils domestiques, PDA...). Il existe plusieurs technologies utilisées pour les WPAN :

##### – Technologie Bluetooth

Elle est connue aussi sous le nom de la norme IEEE 802.15.1, elle a été lancée par Ericsson en 1994, proposant un débit théorique de 1 Mbps lui permettant une transmission de la voix, des données et des images, d'une portée maximale d'une trentaine de mètres. Bluetooth est une technologie peu onéreuse, grâce à sa forte intégration sur une puce unique de 9 mm sur 9 mm ; Elle présente également l'avantage de fonctionner sur des appareils à faible puissance d'où une faible consommation d'énergie.

##### – Technologie ZigBee

Elle est connue aussi sous le nom de la norme IEEE 802.15.4 et permet d'obtenir des liaisons sans fil à bas prix et avec une très faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée pour être directement intégrée dans de petits appareils électroniques (capteurs, appareils électroménagers...). Les réseaux ZigBee permettent d'offrir des débits jusqu'à 250 Kbits/s dans la bande classique des 2,4GHz. Les RCF constituent une des applications que cette norme peut couvrir.

##### – Liaisons infrarouges

Elles permettent de créer des liaisons sans fil de quelques mètres avec des débits pouvant monter à quelques mégabits par seconde. Cette technologie est largement utilisée dans la domotique (télécommandes), elle souffre toutefois des perturbations dues aux interférences lumineuses.

#### WLAN (Wireless Local Area Network)

C'est un réseau permettant de couvrir une portée d'environ une centaine de mètres. Il permet de relier entre eux les terminaux présents dans la zone de couverture. Il existe deux technologies concurrentes :

### – Réseaux Wi-Fi (Wireless-Fidelity)

Ils proviennent de la norme IEEE 802.11, qui définit une architecture cellulaire. On y trouve principalement deux types de réseaux sans fil : Ceux qui travaillent à la vitesse de 11 Mbits/s à 2.4 GHz (IEEE 802.11b) et ceux qui montent à 54 Mbits/s à 5 GHz (IEEE 802.11 a/g).

### – Réseaux HiperLAN 2 (High Performance LAN 2.0)

Ils découlent de la norme européenne élaborée par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). HiperLAN 2 permet d'obtenir un débit théorique de 54 Mbps sur une zone d'une centaine de mètres dans la gamme de fréquence comprise entre 5 150 et 5 300MHz. Ce type de réseau n'a pas reçu autant de succès que la technologie Wifi.

### WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)

Il est connu aussi sous le nom de Boucle Locale Radio (BLR). Il convient de rappeler que la BLR permet, en plaçant une antenne parabolique sur le toit d'un bâtiment, de transmettre par voie hertzienne de la voix et des données à haut débit pour l'accès à l'internet et la téléphonie. Il existe plusieurs types de réseaux WMAN dont le plus connu est :

### – Réseaux Wimax (Worldwide interoperability for Microwave Access)

Ils émanent de la norme IEEE 802.16 et ont pour but de développer des liaisons hertziennes concurrentes aux techniques xDSL terrestres et offrent un débit utile de 1 à 10 Mbit/s dans la bande 10-66 GHz pour une portée de 4 à 10 kilomètres, ce qui destine principalement cette technologie aux opérateurs de télécommunication.

### WWAN (Wireless Wide Area Network)

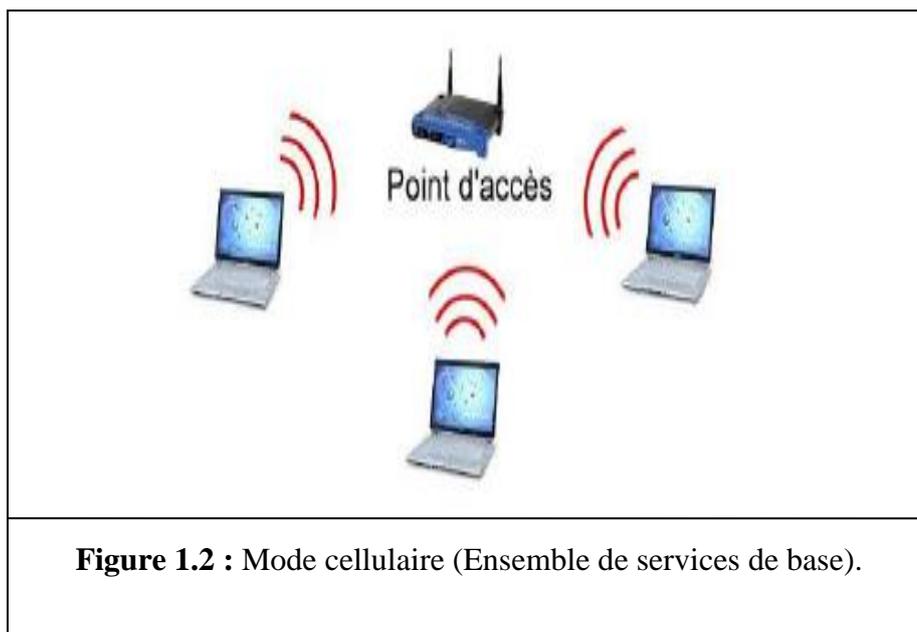
Il est connu sous le nom de réseau cellulaire mobile et il est le plus répandu de tous puisque tous les téléphones mobiles sont connectés à un réseau étendu sans fil. Les principales technologies sont les suivantes : GSM (Global System for Mobile Communication), GPRS (General Packet Radio Service), UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

## 1.2.4 Classification selon l'infrastructure

### Réseaux sans fil Avec infrastructure

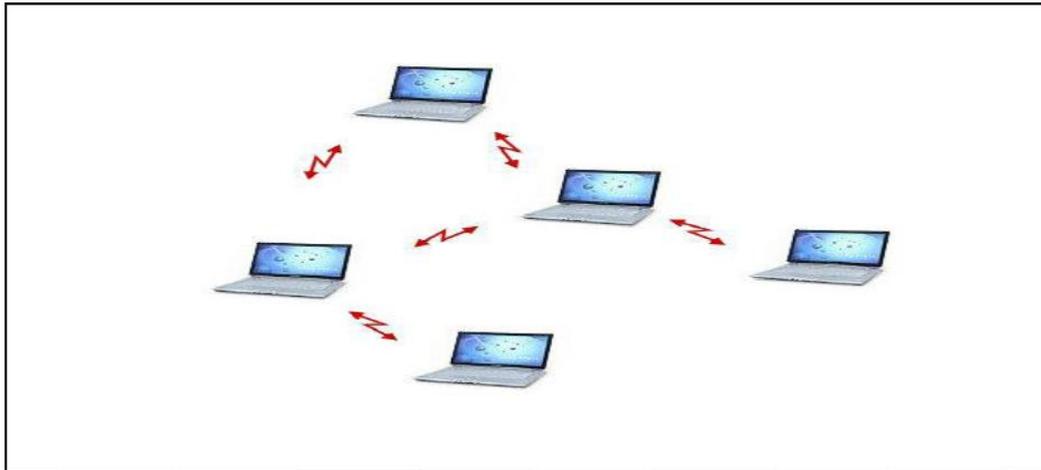
Dans ce type de réseaux, chaque unité mobile (ordinateur, PDA, etc.) se connecte à un point d'accès (station de base) via une liaison sans fils pour former ce qu'on appelle « ensemble de services de base ». Un point d'accès définit une région appelée « cellule ». Celle-ci correspond à la zone de couverture à partir de laquelle les entités peuvent émettre et recevoir des messages.

A un instant donné, une unité mobile ne peut être directement connectée qu'à un seul point d'accès. Toute communication avec des nœuds en dehors de la cellule doit passer par ce point d'accès. Par contre, ces unités peuvent se déplacer de manière transparente (sans perte de connectivité) d'une cellule à une autre [BEC 09].



### Réseaux sans fil sans infrastructure (ad-hoc)

Un réseau mobile Ad hoc (appelé généralement MANET : Mobile Ad hoc Network) est un groupe de calculateurs mobiles qui maintiennent de manière coopérative la connectivité du réseau, en échangeant des informations via des interfaces sans fil, et qui se déplacent dans un territoire quelconque sans l'aide d'une infrastructure préexistante ou d'une administration centralisée.



**Figure1.3** : Mode sans infrastructure (ad-hoc)

Dans ce type de réseaux, la notion de site fixe ou point d'accès n'existe pas. Toutes les stations (nœuds) du réseau se connectent les unes aux autres afin de construire un réseau point à point (P2P pour peer to peer). Ainsi, chaque nœud joue en même temps le rôle de client et le rôle de point d'accès et communique directement avec ses voisins (tous les nœuds se trouvant à sa portée). Quant aux nœuds se trouvant hors de sa portée, la communication se fait à travers d'autres nœuds intermédiaires qui se chargent de trouver un chemin afin de transmettre l'information au nœud destinataire. Ce processus est appelé le routage multi-saut (multi-hop).

La particularité très importante qui distingue ces réseaux des autres est la mobilité des nœuds qui les forment sans l'intervention d'une entité administrative. Ces nœuds se déplacent librement dans le réseau, et à tout moment, des nœuds actifs peuvent quitter le réseau ou de nouveaux nœuds peuvent le rejoindre. Cette caractéristique rend la topologie de ce type de réseaux sans fils très dynamique et nécessite une auto-organisation du réseau [HAM 07].

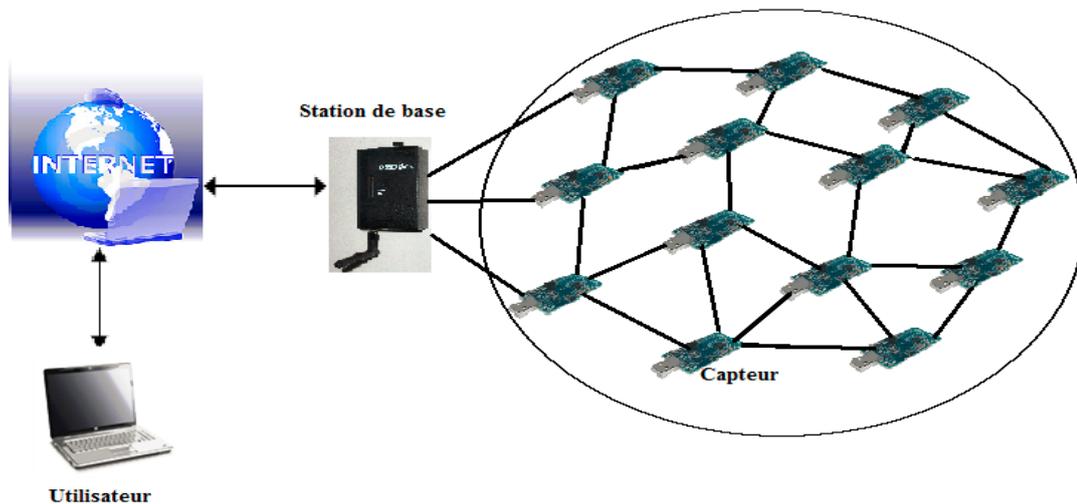
### 1.3 Présentation des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)

Dans cette section, on s'intéressera aux réseaux de capteurs sans fils, tout en détaillant leurs aspects de base (fonctionnement, architecture, pile protocolaire et domaines d'application).

#### 1.4 Architecture d'un RCSF

Un RCSF est constitué d'un ensemble de noeuds qui communiquent entre eux de façon autonome via un lien radio. Dans ce type de réseau les capteurs collectent des données

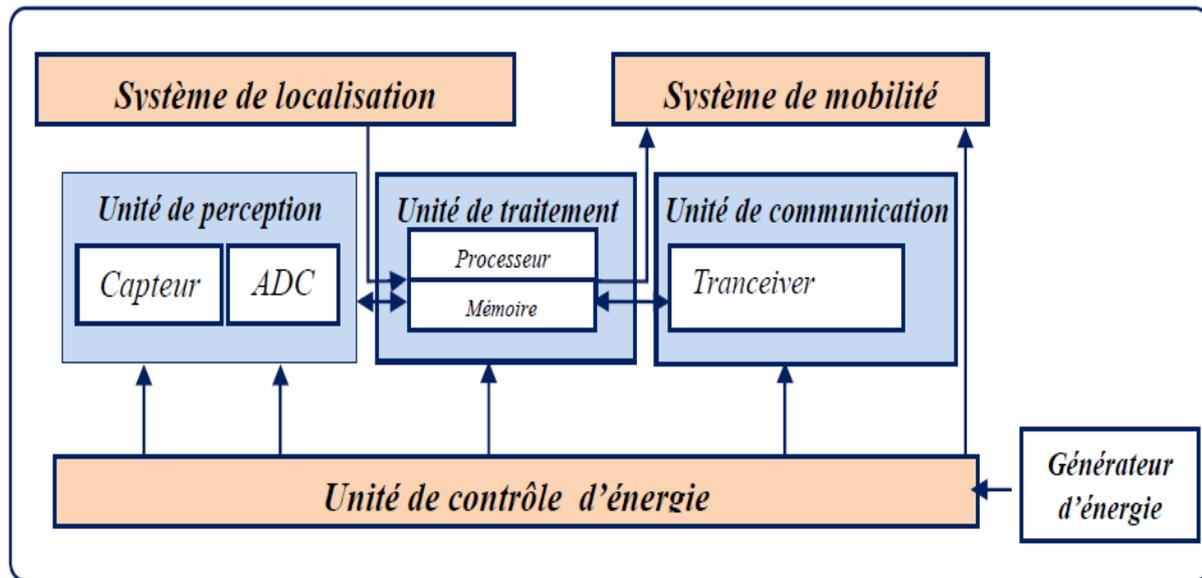
par exemple sur l'environnement; et sont par la suite acheminées à un point centralisé, appelé station de base. Cette dernière est généralement connectée à un ordinateur via internet. Ce type de réseau est généralement déployé dans des environnements hostiles et insécurisés. (Voir la figure 1.4).



**Figure1.4 :** Architecture simplifiée d'un réseau de capteur

### 1.5 Anatomie d'un capteur

Un nœud capteur, tel qu'illustré à la figure 1. 5, est composé de quatre unités de base : l'unité de capture (perception), l'unité de traitement (calcul), l'unité de communication et l'unité d'énergie. Cependant, suivant les applications du capteur, il peut également intégrer des modules supplémentaires tels qu'un système de localisation permettant d'identifier sa position géographique (récepteur GPS, technique de triangulation), un système générateur d'énergie (cellule solaire), ou encore un système mobilisateur pour qu'il puisse se déplacer [HAC 03], [BEN 09]. On détaillera dans ce qui suit les quatre unités de base :



**Figure 1.5** : Anatomie d'un capteur [AKYI 02].

### 1.5.1 Unité de calcul

L'unité de calcul (traitement) comprend un microcontrôleur dédié, associé à une petite unité de stockage. Elle fonctionne à l'aide d'un système d'exploitation spécialement conçu pour les micro-capteurs. Cette unité fournit aux capteurs la capacité d'exécuter des calculs sur les données et les conserver selon un scénario programmé et assure également la gestion des procédures et des protocoles de communication. Il est à noter qu'il est préférable, mais non obligatoire, de disposer de moyens de reprogrammer les capteurs dans le cas d'un changement dans les exigences de l'application.

### 1.5.2 Unité de captage

L'unité de captage est composée de deux sous-unités: un capteur et un convertisseur Analogique/Numérique (ADC pour Analog to Digital Converter). Le capteur permet de relier le nœud avec son environnement extérieur, il est responsable de fournir des signaux analogiques basés sur les phénomènes observés à l'ADC. Ce dernier transforme ces signaux en un signal numérique compréhensible par l'unité de traitement pour pouvoir l'analyser.

### 1.5.3 Unité de communication

Elle est le plus souvent constituée d'un dispositif à base des radiofréquences même s'il arrive parfois d'utiliser des circuits optiques passifs ou actifs. Son rôle est d'assurer la connectivité du capteur au réseau en effectuant toutes les émissions et réceptions de données sur le médium sans fils.

Typiquement, le module sans fils d'un nœud capteur a quatre modes opérationnels :

- Idle: le module est allumé et il n'y a ni émission ni réception (écoute).
- Transmit (Tx): le module sans fils est entrain de transmettre un paquet (émission).
- Receive (Rx): le module sans fils est entrain de recevoir un paquet (réception).
- Sleep: le module est éteint (en veille).

### 1.5.4 Batterie

La batterie est généralement ni rechargeable ni remplaçable. Cette capacité énergétique limitée au niveau des capteurs représente une contrainte importante lors de la conception des différents protocoles pour les réseaux de capteurs. Par ailleurs, les unités d'énergie rechargeables: supportées par des photopiles (cellules solaire) permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique et d'étendre la durée de vie de la batterie [AKYI 02].

## 1.6 Caractéristiques d'un RCSF

Les RCSFs, de fait qu'ils soient des réseaux ad-hoc, héritent de certaines caractéristiques à titre d'exemple : la bande passante réduite, la communication multi-saut, la possibilité d'auto-organisation et la topologie dynamique .Néanmoins, ils se distinguent par d'autres spécificités comme le déploiement aléatoire et dense. Les principales caractéristiques des réseaux de capteurs sont les suivantes: [AKY 01], [VIS 04]

### 1.6.1 Déploiement dense et aléatoire

Un réseau de capteurs se compose d'un nombre très important de nœuds (des centaines voire des milliers). Ce déploiement dense a pour but de permettre une meilleure granularité de surveillance et augmenter la tolérance aux pannes. Le plus souvent, ces capteurs sont dispersés aléatoirement par voie aérienne

### 1.6.2 Topologie dynamique

L'instabilité de la topologie dans les RCSFs peut être expliquée par la mobilité des nœuds, l'ajout ou la défaillance d'un capteur

### 1.6.3 Auto-organisation du réseau

Compte tenu de l'instabilité dans les RCSFs et de la non-intervention d'une entité administrative, une auto-organisation s'avère nécessaire. En effet, chaque nœud doit être capable de localiser ses voisins et établir des routes pour l'acheminement de l'information au sein du réseau.

### 1.6.4 Modèle de communication particulier

La portée de transmission dans les capteurs est réduite à cause des ressources physiques limitées. Cela impose une communication multi-sauts consommant moins d'énergie que la communication traditionnelle à un seul saut. Favorisé par le déploiement dense, ce mode de communication consiste à router les informations à travers des nœuds intermédiaires.

Dans les RCSFs, cet acheminement d'informations est réalisé en trois schémas de communication :

- Many-to-one

Il est adopté pour acheminer les rapports des nœuds capteurs vers le puits.

- One-to-many

Ce schéma est utilisé par le puits pour communiquer avec les capteurs en propageant des requêtes. Ces communications peuvent être générales ou ciblées c'est à dire destinées à une certaine région du réseau.

- Communication locale

Elle se fait en un saut entre les capteurs voisins.

## 1.7 Contraintes d'un RCSF

Les RCSF sont, la plupart du temps, des réseaux sans fil Ad Hoc. Chaque capteur joue le rôle à la fois de routeur et de client dans le réseau. Les grands thèmes de recherche dans les

réseaux sans fil Ad Hoc sont principalement le routage, la localisation, la synchronisation et la qualité de service (QoS) [AKY 01, [VIS 04].

### 1.7.1 Ressources limitées

Les capteurs sont de taille très réduite. Cette donne fait que la quantité de ressources mises dans ces capteurs soit considérablement limitée. Par conséquent, les capacités de traitement, de stockage, de communication et d'énergie sont négativement affectées

### 1.7.2 Durée de vie limitée

La durée de vie d'un réseau de capteurs est définie de l'instant de son déploiement jusqu'au moment de l'épuisement de l'énergie du premier nœud ou d'un certain pourcentage de nœuds. L'alimentation de chaque nœud est assurée par une ressource énergétique généralement limitée et irremplaçable faute de l'environnement hostile où il est déployé. Dès lors, la durée de vie d'un RCSF dépend fortement de la conservation d'énergie au niveau de chaque nœud.

### 1.7.3 Le routage

Parmi les caractéristiques des réseaux Ad Hoc, sa topologie qui ne cesse de se modifier et s'évoluer à chaque déplacement des nœuds qui la compose. Par conséquent, s'il s'agit des nœuds capteurs, les ruptures des liens de communication deviennent beaucoup plus importantes vu la fragilité des capteurs (énergie limitée).

L'adaptation des protocoles des réseaux Ad Hoc à ce type de réseaux (RCSF) s'avère nécessaire afin d'équilibrer la charge entre les nœuds et diminuer le nombre des capteurs hors service.

Dans le cas où une application nécessite uniquement des capteurs sans fils statiques, les protocoles de routage auront uniquement pour tâche essentielle de résoudre les problèmes de changement de route et de répartition de charge, le problème d'exploration du réseau étant atténué.

### 1.7.4 Localisation

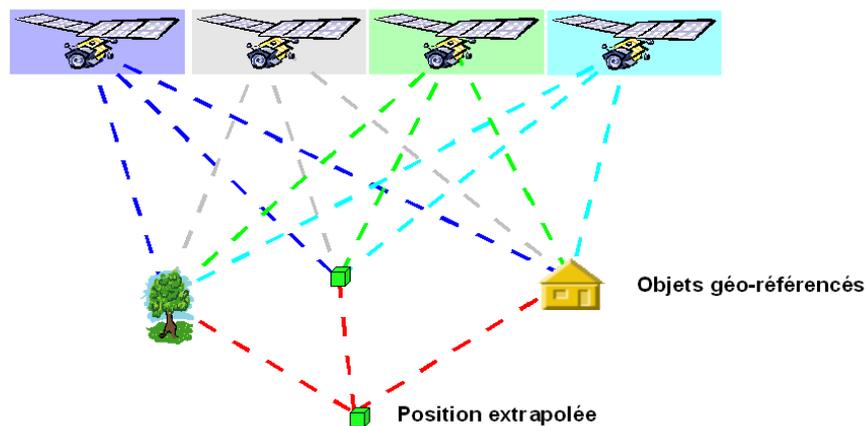
La localisation est un élément important que l'on retrouve dans l'auto-configuration mais également dans le routage proprement dit. Pour améliorer les performances des

protocoles de routage, la localisation est employée pour orienter le flux des messages et éviter une inondation systématique du réseau.

Dans un réseau à forte mobilité le déplacement aléatoire des nœuds pouvant partir à l'opposé de leur position initialement connue ou au comportement global du réseau où de multiples partitions (ou séparation) nuit à la localisation de ces derniers.

Si l'on se focalise sur les RCSF, quand un événement se produit comme un incendie, il faut déterminer rapidement où celui-ci a eu lieu. Pour obtenir cette localisation, le GPS (Global Positioning System) est naturellement le premier dispositif auquel on pense. Toutefois, ses coûts d'achat et en terme d'énergie consommée est un frein à un usage massif.

De plus, dans un environnement urbain, quand son utilisation est possible, l'imprécision observée peut s'avérer importante. Dans une architecture de localisation hybride, les deux méthodes que sont le GPS et la puissance du signal peuvent être combinées. Les nœuds se repèrent, à l'aide de la puissance du signal, par rapport à des éléments géo-référencés du réseau. Ces derniers sont soit des points fixes dont les positions sont connues précisément, soit des capteurs équipés de GPS (voir Figure1.6)



**Figure1.6 :** Architecture de localisation hybride

### 1.7.5 Qualité de Service (QoS)

Dans les RCSF, la notion de qualité de service s'applique à la communication sans fil comme dans les réseaux sans fil Ad Hoc mais également aux contraintes spécifiées par l'application. Dans les réseaux sans fil Ad Hoc, la QoS intègre tous les aspects liés à la transmission de données. Elle s'appuie sur les critères d'évaluation que sont la bande passante disponible, la latence ou le délai de livraison des messages. Dans ce cas, la QoS correspond à une gestion efficace des ressources du réseau pour répondre aux besoins de l'application.

L'élément central est le réseau sur lequel l'application s'appuie et lui fait part de ces besoins au niveau de la transmission de données.

### 1.7.6 La synchronisation temporelle

La synchronisation temporelle est un élément important pour une grande partie des applications de RCSF. La plupart des applications d'acquisition de données requièrent un marquage temporel pour indiquer la date de collecte. Des décalages au niveau de l'heure de certains capteurs impliquent un travail fastidieux de synchronisation post-détection pour avoir une chronologie des événements correcte. Dans le pire des cas, des messages peuvent être considérés comme obsolètes et égarés dans le réseau alors qu'ils transportent des données récentes.

Par un temps d'horloge identique, les capteurs peuvent établir entre eux des « rendez-vous » pour communiquer. Pour économiser de l'énergie, les capteurs alternent entre phase active et phase de veille. Le premier élément mis en veille est le module de communication sans fil très consommateur d'énergie. Sans une parfaite synchronisation temporelle, ce mode de fonctionnement ne serait pas possible car certains capteurs tenteraient de communiquer avec d'autres endormis.

### 1.7.7 Gestion des ressources

Le point crucial à considérer dans les RCSF est la limitation des ressources que sont l'énergie disponible, la mémoire et la puissance de calcul. Un capteur sans fil intègre des technologies qui sont, a priori, maîtrisées dans les domaines allant de l'équipement informatique grand public aux systèmes embarqués. Pour les RCSF, la complexité se situe au niveau des restrictions de ressources à considérer dans, par exemple, l'implémentation d'un algorithme de cryptographie ou de contrôle des erreurs dans un tel capteur.

Au niveau de l'énergie, le module de communication sans fil est un des éléments les plus gourmands en énergie. L'objectif est donc d'avoir un dispositif peu consommateur en énergie et de faible coût.

Dans la conception d'un RCSF, l'une des premières questions à se poser est celle du type d'alimentation à utiliser. On peut s'orienter vers des sources d'énergie quasi illimitées fournies par la nature comme l'énergie solaire ou éolienne. Mais la plupart du temps, ce genre d'énergie n'est pas disponible ou mal adapté. L'exemple des panneaux solaires a déjà été cité. Leur utilisation en environnement chaud et désertique paraît logique et intéressante. Malheureusement, ceux-ci ne peuvent pas être utilisés en plein milieu d'un désert saharien car ils sont soit enterrés par les tempêtes de sable et n'ont donc plus accès au soleil, soit détériorés par les grains de sable qui rayent leur surface, en plus un panneau solaire est un dispositif assez volumineux et encombrant pour un capteur (qui doit être le plus petit possible). La solution la plus répandue actuellement est une alimentation par piles standards (en général pile de type bouton ou AA etc.).

Enfin, les pannes énergétiques qui peuvent potentiellement affecter certains capteurs influent sur la topologie et l'organisation du réseau et rendent le routage encore plus complexe. L'énergie, la mémoire et la puissance de calcul sont des ressources liées entre elles.

Pour limiter la transmission de données qui consomme énormément d'énergie, deux solutions sont possibles. La première est le stockage des données au niveau du capteur associé à une transmission de celles-ci à la demande plutôt que de manière systématique.

En effet, la consommation d'énergie durant une communication sans fil est proportionnelle au nombre d'octets transmis. La seconde solution est l'agrégation de données et repose également sur ce principe. Cette méthode consiste à effectuer des traitements basés sur des fonctions mathématiques (somme/différence, moyenne, maximum/minimum, filtrage ...) ou des algorithmes au niveau de certains nœuds pour diminuer la quantité de données transmises à chaque fois. Que ce soit l'une ou l'autre de ces deux solutions, la consommation d'énergie ne devient pas nulle, elle est moindre par rapport à un mode basé uniquement sur la transmission. Simplement, l'énergie consommée diminue au détriment soit de la mémoire, soit de la puissance utilisée. La gestion des ressources intègre également le passage du capteur en mode veille.

L'ensemble des éléments du capteur ou uniquement le module de communication peuvent être concernés.

### 1.7.8. Gestion des données collectées

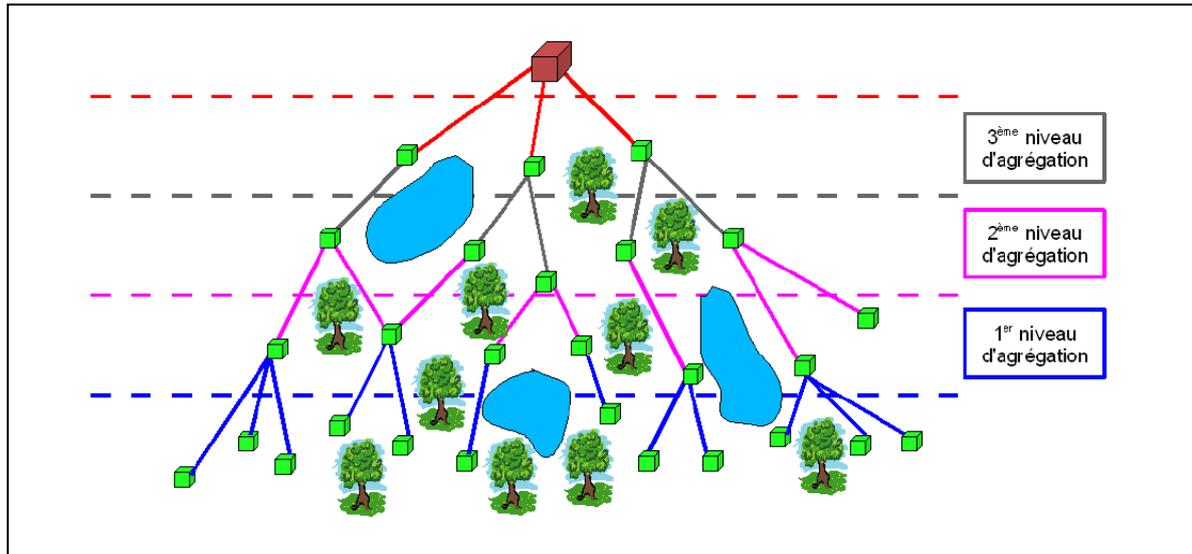
La gestion des données collectées rassemble l'ensemble des traitements subis par les données durant leur cycle de vie au sein du RCSF. L'acquisition à proprement parler est déportée sur le dispositif de mesure de la grandeur physique. Le capteur sans fil est en charge de la bonne récupération des données à la fréquence d'acquisition souhaitée. La réalisation de cette tâche constitue le fonctionnement de base du capteur sans fil auxquelles viennent s'ajouter d'autres, plus ou moins complexes, selon l'application supportée.

La présentation des données se résume à l'envoi des données vers une station centrale de collecte qui affiche les données de manière brute ou sous un format spécifié par l'utilisateur. Dans une version plus élaborée, l'utilisateur peut envoyer des requêtes d'interrogation au RCSF. Il récupère ainsi seulement les données dont il a besoin.

Le stockage de données plutôt que la transmission ne répond pas seulement à une politique d'économie d'énergie. Si les ressources disponibles sont importantes comparativement aux traitements à effectuer, la solution la plus simple et la plus rapide à mettre en place est une acquisition suivie d'une transmission immédiate des données.

Une application de détermination de la température moyenne d'une zone donnée illustre parfaitement l'intérêt de l'agrégation de données. Dans un mode de fonctionnement simple, tous les capteurs transmettent à la station centrale de collecte la valeur de température obtenue à l'endroit où ils étaient placés. En intégrant l'agrégation de données, un arbre à différents niveaux est constitué. Les nœuds feuilles de cet arbre sont regroupés en sous ensemble de capteurs formant des sous-zones ou clusters de premier niveau. Un nœud maître de niveau supérieur est désigné pour chacune de ces sous-zones. Son rôle est de réaliser la première agrégation et de transmettre ensuite ce résultat à son propre nœud maître de niveau supérieur. Ce fonctionnement est répété jusqu'à ce que la station centrale, racine de l'arbre soit atteinte (voir Figure 1.7).

Le nombre de messages échangés au sein du réseau s'en trouve ainsi diminué. De plus, les risques de saturation de la station centrale sont limités, le nombre de données à traiter étant très réduit. Le point critique de ce type d'application est l'élection des nœuds maîtres de zone.



**Figure 1.7 :** Arbre d'agrégation de données

### 1.7.9. Mise à l'échelle

La capacité de mise à l'échelle d'un réseau est son aptitude à être suffisamment flexible pour répondre aux variations du nombre de nœuds qui le composent. Logiquement, l'organisation structurale et le protocole de routage d'un réseau sont évalués en augmentant progressivement le nombre de nœuds. A partir des résultats obtenus, on établit le profil du réseau dans lequel est présente sa capacité de mise à l'échelle. Toutefois, actuellement, que ce soit en simulation ou encore plus en réalité, les tests sur un grand nombre de nœuds sont difficiles voire impossibles à réaliser.

### 1.7.10 Adressage

Le problème de l'adressage est lié à celui de la mise à l'échelle. Le nombre important de capteurs sans fil déployé oblige à se poser des questions sur l'adressage à utiliser. Deux tendances ressortent au sujet de cette problématique :

- Identification unique des capteurs ;
- Identification par localisation.

La première tendance consiste à offrir à chaque capteur un identifiant unique. Quand le nombre de capteurs est limité à une cinquantaine, des solutions simples à mettre en place sont possibles. Cela peut se résumer à affecter un identifiant au capteur au moment de sa

réalisation. Le numéro de série du capteur jouerait le rôle d'adresse. Si les capteurs sont équipés de module de communication IEEE 802.11, l'adresse MAC peut être utilisée pour l'adressage. L'adressage peut être de type IPv4 avec la mise en place d'un serveur NAT (Network Address Translation) au niveau de la station centrale pour relier, si besoin, le RCSF à Internet. Dans une vision globale, chaque capteur pourrait être muni d'une adresse IPv6 « définitive ». Ce type d'adresse est codé sur 16 octets ce qui représente environ  $3.4 \cdot 10^{38}$  adresses possibles. Par conséquent, une plage de ces adresses pourrait être réservée aux capteurs sans fil. Pour les applications de RCSF, les données sont l'aspect le plus important et pas l'identifiant du nœud qui les a collectées.

La deuxième tendance est de ne pas fournir d'identification aux nœuds mais de se centrer sur les données en leur associant un repère spatial et temporel. De cette manière, on sait d'où provient la donnée ainsi que l'heure à laquelle elle a été collectée. Un capteur est ainsi identifié par rapport à sa position. Par exemple, son adresse GPS ou sa zone d'appartenance peut servir d'identifiant et donc, en toute logique, en cas de déplacement, cet identifiant changerait. L'un des avantages de cette méthode est de simplifier la phase de déploiement du réseau. Les nœuds équipés de système de localisation (précis ou non) n'ont qu'à être dispersés sur le lieu d'action. Toutefois, le routage, lui, est complexifié avec l'impossibilité de nommer correctement les nœuds voisins ou faisant partie d'un chemin vers la station centrale de collecte de données.

On peut combiner les deux méthodes, ainsi, Les capteurs sont identifiés à partir d'une adresse GPS à laquelle est associée une adresse IP. L'intérêt est de pouvoir d'une part communiquer individuellement avec un capteur et d'autre part, d'exécuter des récoltes d'information sur une zone géographique donnée.

### 1.7.11 Organisation et le fonctionnement du réseau

Une simplification trop grande du mécanisme de tolérance aux pannes serait de penser que plus le nombre de capteurs dédiés à une zone est important plus le réseau est robuste. Or, les interférences de communication augmentent avec le nombre de capteurs au mètre carré.

En outre, dans un réseau très dense, le routage est fortement lié à la gestion de l'énergie.

Ainsi, les routes peuvent être rallongées en terme de nombre de sauts c'est-à-dire de nœuds rencontrés pour préserver certains nœuds affaiblis. A l'inverse, à la mise en place du réseau, les routes les plus courtes doivent être préférées surtout celle qui relie le nœud à la station

centrale de collecte de données. Ces problématiques s'inscrivent dans une démarche de recherche à mi-chemin entre réseau et recherche opérationnelle.

Les aspects qui viennent d'être cités font partie des éléments à considérer au niveau de l'organisation du réseau. Face à une application donnée, l'une des premières choses à établir est le nombre de capteurs à déployer c'est-à-dire le dimensionnement du réseau. La complexité de celui-ci dépend du degré de connaissance sur le phénomène observé. Dans une application de surveillance d'incendie ou de suivi à la trace, le nombre et l'emplacement des capteurs sont parfois choisis aléatoirement.

Par ailleurs, de multiples architectures de réseau existent et s'appuient sur des topologies à plat, hiérarchiques à un ou plusieurs niveaux, avec ou sans groupes ou clusters dont les contours sont parfaitement dessinés. L'une ou l'autre organisation est encore choisie selon des critères de gestion d'énergie, de protocole de routage et de contraintes d'application.

L'habilité de reconfiguration d'un réseau est un point à prendre en compte dans son fonctionnement. En cas de déploiement dans un lieu peu ou pas accessible, l'attribution à distance de nouvelles tâches ou missions aux nœuds est une fonctionnalité intéressante voire primordiale.

### **1.7.12 Sécurité**

Les besoins en sécurité sont réels et indispensables pour une démocratisation des RCSF. En effet, la confidentialité des données tout au long de la chaîne d'acquisition est une nécessité pour un bon nombre d'applications. Les données doivent donc être sécurisées durant la transmission par communication sans fil et, même parfois, durant le stockage. La sécurisation d'un réseau sans fil seul est déjà complexe car elle s'applique à un support de communication non guidé. L'ajout de mécanisme de cryptographie au niveau du stockage des données rend la tâche encore plus difficile au regard de l'énergie et de la puissance de calcul disponibles dans un capteur sans fil.

D'autre part, l'identification par zone géographique, donc non unique pour les capteurs, ou changeante selon leur localisation est un facteur aggravant. Une politique d'adressage mal établie représente une faille exploitable par les attaques par usurpation d'identité. Un intrus malintentionné peut, après avoir trouvé sa place dans le réseau, envoyer des paquets par inondations successives ou diffusions étendues (« broadcast ») afin d'épuiser le réseau.

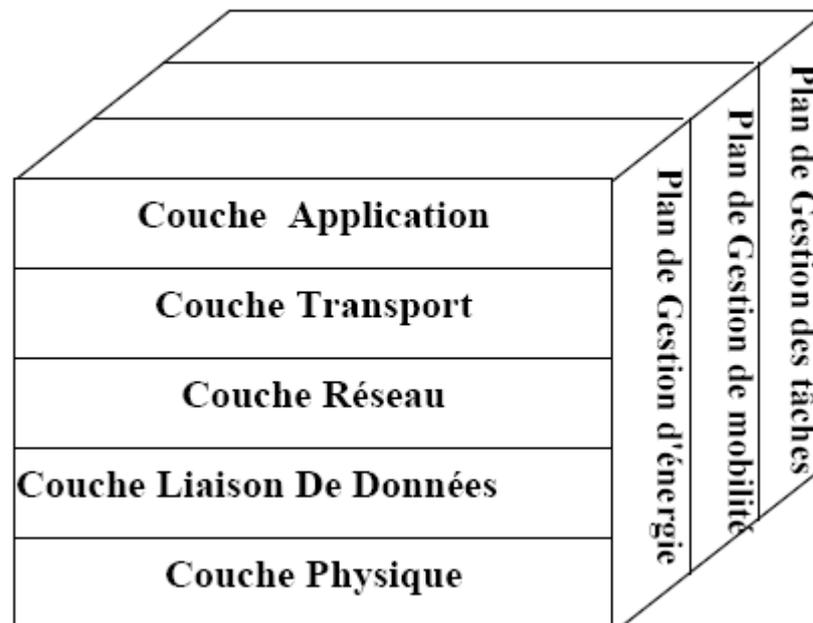
Les RCSF s'organisent autour du principe de coopération qui intervient dans le routage, les traitements sur les données (agrégation de données par exemple),... Les opérations effectuées sont basées sur la confiance existante au sein du réseau. La technique de sécurité employée doit constituer un compromis entre efficacité de protection et préservation d'une vitesse satisfaisante d'échange entre capteurs.

## 1.8 Pile protocolaire dans les RCSFs

Par analogie au modèle OSI (Open Système Interconnexion) des réseaux filaires, le modèle de communication utilisé dans les réseaux de capteurs comprend cinq couches qui ont les mêmes fonctions que celles du modèle OSI.

Comme la communication n'est pas le seul souci dans les réseaux de capteurs, il y a d'autres critères très importants qu'il faut en tenir compte. De ce fait, d'autres couches supplémentaires sont ajoutées pour gérer l'énergie, la mobilité des nœuds et l'ordonnancement des tâches.

Le rôle et les caractéristiques des couches : application, transport, réseau, liaison de données, physique et les niveaux intégrés : plan de gestion d'énergie, plan de gestion de mobilité et le plan de gestion de tâche (voir la figure 1.8) sont résumés dans le paragraphe suivant.



**Figure1.8** : Modèle en couches (pile protocolaire) d'une architecture de réseau de capteurs [AKY 02].

### 1.8.1 Couche physique

Dans cette couche les besoins d'une modulation simple et robuste à motiver l'utilisation des techniques de transmission et de réception de données afin d'assurer la sélection des fréquences, la génération des porteuses et le cryptage des différentes données. De manière générale, le choix d'un bon schéma de modulation est critique et dépend du système utilisé.

### 1.8.2 Couche liaison de données

La couche liaison est à la charge du multiplexage de données, détection des trames, la gestion de l'accès au support de communication et le contrôle d'erreurs. Elle assure la fiabilité de la communication point à point et multipoint. Cependant, les protocoles MAC (Media Access Control) conventionnels ne sont pas directement applicables dans les réseaux de capteurs. Cette couche, exige l'utilisation de protocoles qui doivent être capables : de réduire au minimum la collision avec l'émission des voisins et de minimiser les retransmissions.

### 1.8.3 Couche réseau

Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont dispersés à forte densité pour observer un phénomène dans une région. Par conséquent, ils sont très proches les uns des autres. Pour assurer la propagation du signal sans effets de dégradation, les réseaux de capteurs utilisent une communication multi sauts [BEC 09].

De plus, les nœuds doivent consommer moins d'énergie pour acheminer les données capturées dans le réseau au nœud puits, ce qui rend l'utilisation des protocoles de communication traditionnels des réseaux Ad hoc impraticables. Par ailleurs d'autres caractéristiques peuvent être citées afin d'illustrer le besoin de nouveaux protocoles de routage pour les réseaux de capteurs:

- il n'est pas possible d'établir un système d'adressage global vu le grand nombre de nœud capteurs.
- les applications des réseaux de capteurs exigent l'écoulement des données mesurées par de multiples sources à un nœud puits particulier.
- Les multiples capteurs peuvent produire les mêmes données à proximité d'un phénomène (redondance des données captées due à la forte densité de déploiement).

- les capteurs exigent une gestion soignée des ressources disponibles à savoir : la puissance de transmission, énergie de la batterie, ainsi que la puissance de traitement et stockage.

#### **1.8.4 Couche transport**

Cette couche constitue une interface entre la couche application et la couche réseau. Elle est responsable : du transport de données, leur découpage en paquets, contrôle de flux, conservation de l'ordre des paquets et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission [ILY 04].

#### **1.8.5 Couche application**

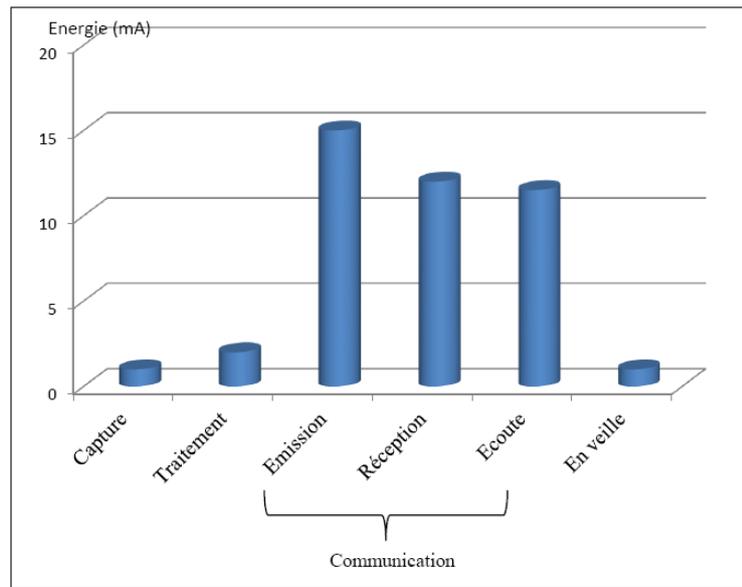
Suivant la fonctionnalité des capteurs, différentes applications peuvent être utilisées et implémentées sur cette couche. Elle fournit des mécanismes pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le réseau en lui fournissant des interfaces pour la création et la diffusion des requêtes et un moyen d'interpréter les réponses reçues [HAM 07].

#### **1.8.6 Gestionnaire de la mobilité**

Il permet la détection et l'enregistrement des mouvements des nœuds capteurs afin de maintenir des informations sur leurs localisations et d'entretenir continuellement une route vers l'utilisateur final. Dans plusieurs cas les nœuds capteurs peuvent être mobiles suite à une configuration d'une nouvelle topologie ou bien par un changement d'emplacement désiré par l'utilisateur. Le système de gestion de mobilité doit être capable de commander les nœuds pour réaliser les mouvements nécessaires.

#### **1.8.7 Gestionnaire de l'énergie**

Cette partie gère la manière dont les nœuds utilisent leurs énergies. Généralement un capteur ne nécessite qu'une source énergétique limitée ( $< 0.5$  Ah, 1.2 V). Comme la vie du nœud a une dépendance forte à l'égard de la vie de la batterie, il doit par conséquent contrôler et minimiser sa consommation d'énergie. Par exemple, après la réception d'un message, le capteur éteint son récepteur et se met en mode sommeil afin d'éviter la duplication des messages déjà reçus. En outre, si le niveau d'énergie atteint un seuil bas, le nœud diffuse à ses voisins une alerte pour les informer qu'il ne peut pas participer au routage [[POM 04].



**Figure 1.9 :** Répartition de la consommation d'énergie dans un capteur.

### 1.8.8. Gestion de tâche

Ordonnance et balance les différentes tâches de capture de données dans une région spécifique. Il n'est pas nécessaire que tous les nœuds de cette région effectuent la tâche de capture en même temps ; certains nœuds exécutent cette tâche plus que d'autres selon leur niveau de batterie.

## 1.9 Consommation d'énergie dans les RCSF

La première étape dans la conception de système énergétique de capteurs consiste à analyser les caractéristiques de consommation d'énergie d'un nœud de capteur sans fil. Cette analyse systématique de l'énergie d'un nœud capteur est extrêmement importante pour identifier les problèmes dans le système énergétique pour permettre une optimisation efficace. L'énergie consommée par un capteur est principalement due aux opérations suivantes : la détection, le traitement et la communication. [RAG 02], [HEI 00].

### Energie de capture

Les sources de consommation d'énergie des nœuds pour les opérations de détection ou de capture sont : l'échantillonnage, la conversion analogique-numérique, le traitement de signal et l'activation de la sonde de capture.

## Energie de traitement

L'énergie de traitement est composée de deux sortes d'énergie: l'énergie de commutation et l'énergie de fuite. L'énergie de commutation est déterminée par la tension d'alimentation et la capacité totale commutée au niveau logiciel (en exécutant un logiciel).

Par contre, l'énergie de fuite correspond à l'énergie consommée lorsque l'unité de calcul n'effectue aucun traitement. En général, l'énergie de traitement est faible par rapport à celle nécessaire pour la communication.

## Energie de communication

L'énergie de communication se décline en trois parties : l'énergie de réception, l'énergie de l'émission et l'énergie en état de veille. Cette énergie est déterminée par la quantité des données à communiquer et la distance de transmission, ainsi que par les propriétés physiques du module radio. L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

### 1.10 Domaines d'application

Les RCSF peuvent être classés selon leur domaine d'application ou la tâche qui leur est allouée. A chaque application, un scénario est défini et comprend le nombre et le type de capteurs utilisés, le rôle de chacun, la topologie du réseau (regroupement en cluster, etc.) [VAU 04], [CHE 04], [EST 02], [ABD 08]

#### 1.10.1 Environnement

Les RCSF donnent la possibilité d'étudier des phénomènes plus près que ne le permettent des dispositifs classiques. L'accessibilité à certains endroits est possible ou du moins simplifiée grâce aux RCSF. On peut prendre l'exemple d'une forêt tropicale comme la forêt amazonienne. Cette forêt est tellement dense et par certains points hostile à l'homme que l'utilisation d'un réseau de capteurs pour l'étudier pourrait être envisagée. Les capteurs pourraient être ainsi disséminés par voie aérienne sur un périmètre donné et renvoyer les données collectées par transmission sans fil. Le problème majeur dans ce mode de fonctionnement, en plus du développement de capteurs petits et robustes, est la récupération de ces mêmes capteurs après l'accomplissement de leur tâche.

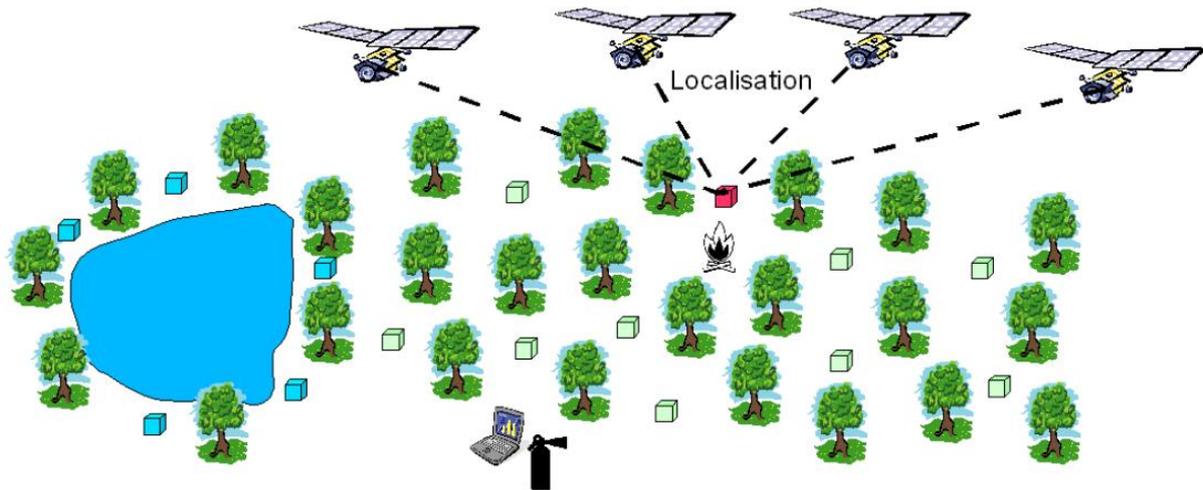
Au-delà de l'exemple précédent, l'architecture d'un capteur sans fil avec un module de communication sans fil, une puissance de calcul raisonnable et un ensemble de capteurs dédiés à l'étude de grandeurs physiques rend possible son intégration dans un environnement physique donné. Les grandeurs physiques mesurées sont la température, l'humidité, la tension du sol, le degré de luminosité, le niveau sonore. L'observation des animaux dans leur habitat prend une place importante dans les applications environnementales. Les capteurs sans fil déployés dans une réserve naturelle donnent des informations de localisation sur les animaux, leur état de santé, sur leur intégration dans un nouvel habitat. Les RCSF ont permis l'observation d'oiseaux sans troubler leur habitude en évitant une intervention humaine jugée inappropriée.

L'agriculture est un secteur où les RCSF sont de plus en plus utilisés. Les capteurs collectent des données sur les cultures et la qualité du sol et les transmettent à une station centrale présente dans la ferme. Si la station est connectée à Internet, il est possible, sous couvert d'une autorisation, d'accéder aux informations sur l'ensemble de l'exploitation.

La prévention des risques d'incendie ou d'inondation fait partie des domaines où les RCSF apportent les plus grandes perspectives. Dans ce type d'applications, les capteurs sans fil sont en charge de la détection de tous phénomènes anormaux observés dans leur périmètre d'action. Il peut s'agir d'une brusque augmentation de la température ou du taux d'humidité caractéristique d'un début d'incendie ou d'inondation. Chaque capteur est soit placé à un endroit connu, soit muni d'un système de localisation de type GPS. Ainsi, à l'autre bout du réseau, la station centrale peut fournir des renseignements précis permettant une intervention rapide et localisée (voir Figure 1.10).

Dans la surveillance des risques d'inondation, les capteurs sont obligatoirement étanches. Pour les incendies, ils doivent être assez robustes pour supporter pendant un temps suffisant de très fortes températures. Le capteur doit pouvoir détecter le départ du feu et transmettre le plus de données possibles avant sa détérioration.

Les RCSF aident également à l'étude de phénomènes complexes tels que les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, les ouragans et les tsunamis. Ils fournissent des données permettant d'établir des modèles de prévision. Pour quelques applications présentées dans cette section, des systèmes filaires existaient déjà mais étaient plus difficiles à déployer et n'offraient parfois pas autant de fonctionnalités.



**Figure 1.10 :** Surveillance d'incendie et d'inondation.

### 1.10.2 Médical

Les capteurs peuvent être implantés dans le corps humain pour contrôler les problèmes médicaux comme le cancer et pour aider les patients à maintenir leur santé. Ils peuvent être utilisés aussi pour surveiller les patients et l'avancement de leurs états dans un hôpital. En outre, en implantant sous la peau des mini capteurs vidéo, on peut recevoir des images en temps réel d'une partie du corps sans aucune chirurgie et pendant environ 24h. On peut ainsi surveiller la progression d'une maladie ou la reconstruction d'un muscle. Un projet actuel consiste à créer une rétine artificielle composée de 100 micro-capteurs pour corriger la vue.



**Figure1.11 :** le flux d'information d'un patient

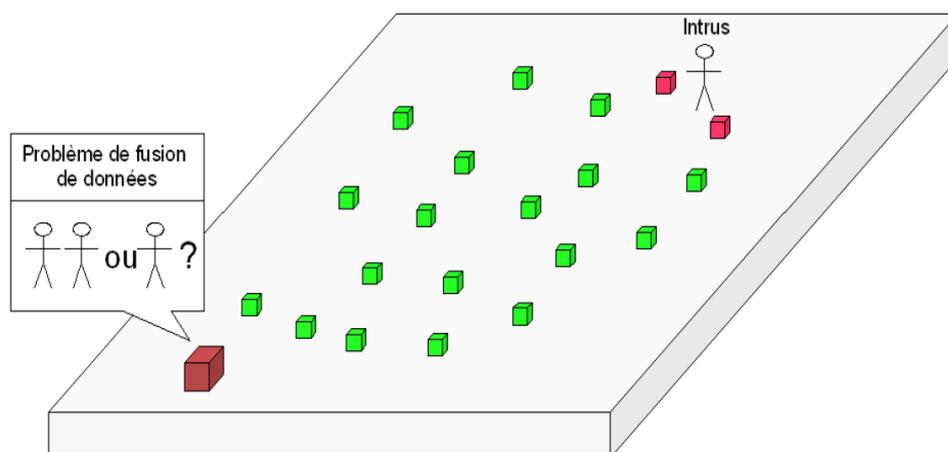
### 1.10.3 Habitat

Les capteurs entrent de plus en plus dans nos vies quotidiennes. Dans le milieu urbain, les capteurs sont déjà utilisés pour la localisation des bus, pour des tickets électroniques et pour la sécurité. Une des applications est la surveillance du trafic routier avec les réseaux de capteurs déployés sur les autoroutes.

De plus, les maisons, les bâtiments, les bureaux équipés de capteurs intelligents permettent de construire des systèmes pervasifs (propagateurs) où l'information est omniprésente.

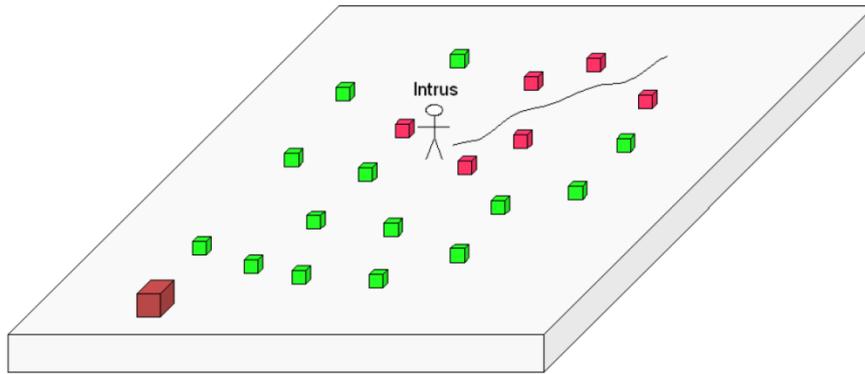
### 1.10.4 Militaire

Les applications militaires des RCSF sont multiples. Certaines ont pour but la protection des soldats engagés sur un champ de bataille. Une première application est de fournir au soldat des dispositifs destinés à surveiller ses signes vitaux. Equipé d'un module de repérage, il est possible de localiser la position de l'ensemble des membres d'une unité et d'établir ensuite une stratégie de défense ou d'attaque. La prévention liée aux attaques chimiques, biologiques voire nucléaires par une détection anticipée fait partie des applications envisagées pour les RCSF. Des capteurs mobiles sont envoyés en repérage sur un champ de bataille et donnent des indications sur les risques présents une zone délimitée autour d'un camp de base peut être surveillée à l'aide d'un RCSF. Une telle application repose sur des dispositifs spécifiques de détection présents sur les capteurs. Ces derniers sont positionnés dans des endroits précis et en charge de l'observation d'une zone donnée. En cas d'intrusion, un message est transmis à travers le réseau en direction des entités à alerter



**Figure 1.12:** Détection d'intrusion par un réseau de capteurs sans fil.

Le suivi à la trace (ou « mobile tracking » en anglais) accompagne parfois la détection d'une intrusion (voir Figure 1.13). Localiser avec précision les forces ennemies et suivre leurs déplacements est un avantage important durant une bataille. Cette opération est obtenue en plaçant à l'avance un réseau de capteurs tout au long d'un parcours qui pourrait être emprunté par l'ennemi. Les problèmes de cohérence entre le phénomène réel et l'observation qui en découle, soulevés pour l'application précédente restent valables. Les techniques de détection utilisent des capteurs vidéo, acoustiques et de chaleur.



**Figure 1.13 :** Suivi à la trace par un réseau de capteurs sans fil.

### 1.11 Quelques axes de recherche dans les RCSFs

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSF) sont une thématique de recherche en pleine expansion. Durant les dix dernières années, de nombreux travaux et études ont été menés pour répondre aux différentes problématiques posées. Tout développement réalisé dans les RCSF est tenu de respecter des contraintes en rapport avec les ressources disponibles et le niveau de miniaturisation souhaitée. Ces contraintes ont eu pour conséquence soit de créer des problématiques nouvelles, soit d'amplifier certaines déjà existantes comme, par exemple, celles relatives à la communication sans fil. Ainsi, tout module de communication sans fil doit, en plus d'assurer la transmission de données, consommer un minimum d'énergie pour pouvoir envisager son utilisation dans un RCSF. De plus, les ressources d'un capteur sans fil que sont l'énergie, la mémoire et la puissance de calcul sont liées entre elles. Généralement, la préservation de l'une d'entre elles implique une consommation plus importante de l'une ou des deux autres. Le bon fonctionnement de l'application supportée passe donc par une gestion intelligente des ressources présentes au sein de chaque capteur du réseau [BEN 13], [JOH 06].

### 1.11.1 Tolérance aux pannes

La robustesse des capteurs sans fil est un élément très important. Le premier argument dans ce sens est lié aux endroits inaccessibles pour une opération de maintenance où les capteurs peuvent être déployés. Lors d'une utilisation à l'extérieur, il est très rare de disposer d'un atelier électronique mobile adapté à une réparation des capteurs in-situ.

De plus, au vue du nombre de capteurs qui peuvent être déployés pour une application, il est important de conserver un taux de panne demandant un remplacement relativement faible. Si le taux de panne est de 10%, cela reste raisonnable pour une dizaine de capteurs mais pas pour un millier.

Dans les RCSF, les causes de pannes sont nombreuses et sont, par exemple, des dommages liés à l'environnement (chute de pierre, feu, eau, animaux,...), un manque d'énergie (batteries endommagées,...), des interférences liées à l'environnement (interférences électromagnétiques ou liées aux bâtiments,...). Ce dernier point correspond à un état où le capteur fonctionne correctement mais n'arrive pas à communiquer avec les autres capteurs du réseau. Parallèlement à cela, on peut ajouter les pannes logicielles liées au système d'exploitation ou aux programmes embarqués dans le capteur.

La tolérance aux pannes peut également être définie pour le RCSF dans sa globalité.

Le niveau de tolérance d'un réseau correspondrait à la capacité qu'aurait celui-ci à faire face aux différentes pannes des capteurs qui le composent. Cette capacité se mesurerait en nombre de capteurs pouvant tomber en panne sans que cela n'empêche le réseau d'exécuter la tâche qui lui a été attribuée.

### 1.11.2 Sécurité

Les réseaux modernes de capteurs sans fil exigent degré spécifique et de haute de la sécurité en raison de leurs tâches de limitation et de polyvalence. L'absence d'infrastructures permanentes qui rend ces réseaux adapté à de nombreuses applications civiles. Mais leur limite restrictions de ressources de capacité de calcul et de la batterie marques vulnérables à toutes sortes d'attaques. De nombreux travaux étudient la fiabilité des transmissions dans les RCSFs par un calcul mathématique de la fiabilité d'un RCSF et proposent des façons de sécuriser ces derniers. D'autres travaux effectuent des tests pour

évaluer en pratique le taux de sécurité dans un RCSF, tel qu'un test de conformité vérifie si une implémentation donnée est conforme à la spécification de protocole de sécurité étudié.

L'un de ces travaux a ajouté un test aléatoire pour évaluer la sécurité de la mise en œuvre d'un protocole de sécurité. Quand aux autres recherches visent à créer un meilleur mécanisme d'authentification afin d'assurer que l'identité déclarée par un capteur est bien celle du capteur déclarant. Tous ces travaux sur la sécurité visent à garantir la disponibilité du réseau, l'intégrité et la confidentialité des données échangés entre les nœuds capteurs.

### 1.11.3 Routage

Le routage dans les RCSFs forme un autre axe de recherche intéressant, avec un ensemble limité mais en pleine croissance de résultats de recherches. Cette croissance est fortement liée à deux facteurs :

- Les capteurs sont véritables systèmes embarqués et donc conçus pour des applications spécifiques.
- L'expansion du champ du domaine d'application des RCSFs.

Les protocoles de routage proposés pour les RCSFs sont donc nombreux, mais ils ont tous un même objectif : assurer l'acheminement des données collectées par les nœuds capteurs tout en essayant d'étendre la durée du réseau. Afin de concevoir un protocole de routage robuste et efficace, il est primordial de prendre en considération les facteurs et les contraintes imposés par les réseaux de capteurs, tel que : le déploiement des nœuds, le modèle de prélèvement des données, la consommation d'énergie, la fiabilité, la scalabilité, la mobilité des nœuds, la connectivité, la couverture, l'agrégation de données et la qualité de services, ainsi de prendre en compte des exigences des application pour lesquelles ces réseaux sont destinés.

### 1.11.4 Auto-organisation

Un réseau de capteur sans fil est typiquement un réseau ad-hoc, qui exige chaque nœud capteur soit indépendant et assez flexible à l'auto organisation. Il n'y a aucune infrastructure fixe disponible pour la gestion de réseau dans un réseau de capteurs. L'auto organisation apporte un grand défi à la sécurité du réseau de capteurs sans fil.

## 1.12 RCSFs versus ad-hoc

Les RCSF sont souvent considérés comme étant les successeurs des réseaux ad-hoc. Les RCSF partagent avec ad-hoc plusieurs propriétés en commun, telles que l'absence d'infrastructure, les communications sans fil, l'architecture décentralisée, l'autonomie. Néanmoins, l'une des différences clés entre les deux architectures est le domaine d'application. Le tableau 1.1 donne une petite comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc. [BAH 10]

RCSF	Ad-hoc
Objectif ciblé	Générique/communication
Les nœuds collaborent pour remplir un objectif	Chaque nœud a son propre objectif
Plusieurs à un	Débit/qualité de service
Broadcast	Communication ppp
Très grand nombre de nœuds n'ayant pas la même d'identification	Identification unique
Grand nombre de nœuds	Relativement réduite
Déploiement très dense	Beaucoup moins dense
Enclin aux défaillances /pannes	Plus résistant
Processeurs limité en calcul	CPU très performant
Mémoire de quelques Kilo-octets	Méga-octets

**Tableau 1.1** : comparaison entre les RCSF et les réseaux Ad-hoc

## 1.13 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté des généralités sur les réseaux sans fils, puis on a vu les concepts généraux concernant les réseaux de capteurs sans fils (définition, communication, caractéristiques, domaines d'application, le routage dans les RCSFs contraintes et axes de recherches).

# **Chapitre 2 : Auto-organisation dans les RCSFs**

## 2.1 Objectif

L'auto-organisation implique les notions de pérennité et de rétroaction. La pérennité est la caractéristique d'une structure organisationnelle capable de se maintenir au cours du temps dans son environnement. Par rétroaction, on entend le fait que la structure émergente influe à son tour sur les parties qui la constituent [ENC 09].

Les systèmes auto-organisés sont généralement robustes et résistent aux pannes, car ils sont très redondants. L'absence de contrôle central et de planification leur permet aussi d'être très adaptatifs : le système s'adapte localement aux problèmes rencontrés. Ces systèmes sont aussi très réactifs et répondent rapidement à des *stimuli* extérieurs.

L'auto-organisation est parfois basée sur le concept de bruit (information non sollicitée et imprévisible perturbant le système), ou plus précisément d'ordre par le bruit. Les systèmes auto-organisés sont dans ce cas capables, lorsqu'ils sont perturbés par du bruit, de converger vers un état imprévisible et stable, différent de celui qu'ils occupaient précédemment.

Certaines des topologies logiques de l'auto-organisation proposent le système de mise en veille des nœuds pour conserver l'énergie pour une utilisation ultérieure, d'autres proposent de définir une puissance de transmission pour chacun des nœuds afin de réduire le coût énergétique total des réseaux. Afin d'améliorer les performances du réseau, elles introduisent la notion de réputation des nœuds. Cette topologie logique peut aussi réduire les interférences et par la suite augmenter le débit du réseau [ROM 12].

Dans ce présent chapitre nous allons détailler la notion de l'auto-organisation (rôle et objectifs) et ses principales techniques notamment la technique d'auto-organisation en clusters.

## 2.2 Auto-organisation basée sur la mise en place d'un CDS

La technique de mise en place d'une hiérarchie se base sur l'affectation des états au niveau des nœuds du réseau : Nous trouvons ainsi des nœuds dominants et des nœuds dominés. L'ensemble des nœuds dominants est de sorte que tous les nœuds du réseau sont, soit dans cet ensemble, soit voisin d'un nœud dominant de cet ensemble. L'ensemble de nœuds dominants est dit connecté si et seulement s'il existe un chemin entre chaque paire de nœuds composant cet ensemble. Quatre principaux protocoles trouvés dans la littérature pour

cette famille orientée dominant : CDS-règle  $k$  (Connected Dominating Set-règle  $k$ ), CDS-IDS (CDS Independent Dominating Set), Legos (Low Energy self-Organization Scheme [TOU 80], [QAY 02], [PEN 02], [LU 07]).

### 2.2.1 CDS-règle $k$ (*Connecting Dominating Set règle- $k$* )

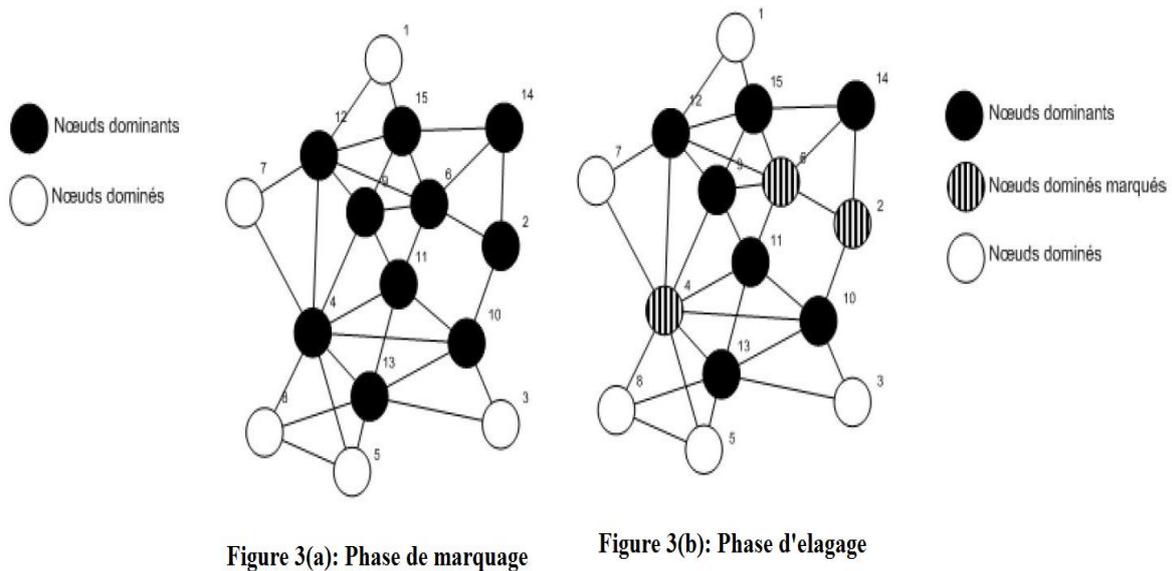
Soit  $S$ , un ensemble connecté dominant (CDS).  $S$  est défini comme un sous-ensemble de l'ensemble des sommets  $V$ , qui satisfait les trois points suivants :

- Chaque nœud de l'ensemble  $V$  est soit dominant (dans l'ensemble  $S$ ), soit dominé.
- Un nœud dominé a un voisin à un saut appartenant à l'ensemble  $S$ .
- L'ensemble  $S$  est connecté.

On distingue deux phases : une phase de marquage et une phase d'élagage de la règle  $k$ .

- Durant la première phase de marquage, chaque nœud se marque quand il possède deux voisins non-connectés entre eux (voir figure 3(a)).
- Après cette première phase, le processus d'élagage de la règle  $k$  est appliqué par chaque nœud marqué. Si l'ensemble des voisins d'un nœud dominant sont couverts par un ensemble dominant de  $k$  nœuds voisins, et que ce nœud a le plus petit identifiant, alors ce dernier devient un nœud dominé (voir figure 3(b)).

L'algorithme de CDS-règle  $k$  est complètement localisé. Il définit un ensemble connecté dominant de plus fort poids dans le voisinage. Chaque nœud appliquant cet algorithme besoin des informations sur son voisinage à deux sauts. Dans cette optique, le recours aux paquets « *Hello* » est indispensable.



**Figure 2.1:** Principe du protocole CDS-règle  $k$ .

### 2.2.2 CDS-IDS (*Connected Dominating Set-Independent Dominating Set*)

La construction du CDS-IDS peut se résumer en 3 étapes :

1. Construction de l'arbre couvrant
2. Construction de l'ensemble indépendant dominant (IDS)
3. Construction de l'arbre dominant

Un ensemble dominant indépendant est un ensemble dominant dans lequel chacun des nœuds est non adjacent avec les autres nœuds de l'ensemble. Un nœud appartenant à un IDS est donc, par définition, éloigné d'au moins deux sauts et d'au plus trois d'un autre nœud dominant. La particularité de l'IDS construit par les auteurs est que chaque nœud est à exactement 2 sauts d'un autre nœud de l'ensemble. Ils utilisent pour cela la notion de *rang*. Ce rang est calculé grâce à la distance en nombre de sauts à la racine de l'arbre et à l'identifiant unique du nœud, et va ainsi créer un ordonnancement total parmi les nœuds. [KAR09]

L'IDS est ensuite construit de la racine vers les feuilles de la façon suivante :

**Algorithme :** Construction de l'IDS

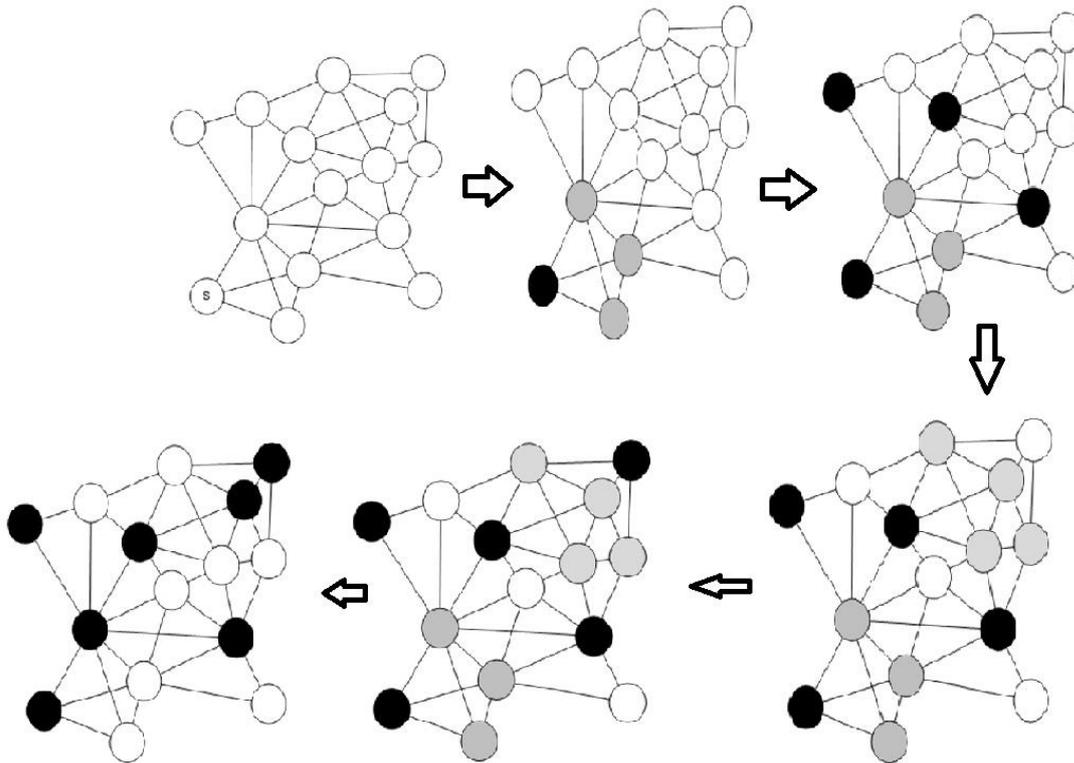
1. La racine fait partie de l'IDS et envoie un message *BLACK*.
2. Les nœuds qui reçoivent un message *BLACK* se déclarent gris et envoient un message *GREY*.
3. Si un nœud reçoit un message *GREY* de l'ensemble de ses voisins de rang inférieur, il se déclare noir et envoie un message *BLACK*.

Les nœuds déclarés « noir » appartiendront à l'IDS. Pour construire un CDS, les nœuds noirs désignent un parent de rang inférieur, en partant à nouveau de la racine vers les feuilles (Figure2.2).

Les parents de nœuds IDS seront considérés comme dominants. Ils formeront, avec les nœuds IDS, l'ensemble dominant connecté.

Cette topologie se distingue des autres en ceci qu'elle est entièrement distribuée : la construction de l'IDS et du CDS ne se réalise qu'après une phase de découverte du réseau qui va permettre de classer les nœuds selon leur hauteur dans l'arbre couvrant.

Cette connaissance quasi globale du réseau va permettre une meilleure sélection de l'ensemble dominant connecté.



**Figure 2.2 :** Schéma illustrant le principe de l'algorithme CDS-IDS

### 2.2.3 Legos (*Low Energy Self-Organization Scheme*)

Legos (*Low Energy Self-Organization Scheme*) est un protocole d'auto-organisation visant à générer une topologie logique en épine dorsale non-orientée sous l'hypothèse d'un déploiement progressif ou sous l'hypothèse que les nœuds ne se réveillent pas simultanément pour rejoindre la topologie logique..

Avec Legos, les nœuds sont dans l'un des trois états suivants : Chef (*Leader L*), Passerelle (*Gateway G*) ou Membre (*Member M*). Les nœuds *Membres* sont des nœuds dominés et les nœuds *Leaders* et *Gateways* sont des nœuds dominants. Chaque nœud *Member* est relié à un seul *Leader*. Ce dernier est en charge de toutes les communications dans son voisinage à 1 saut. Les *Leaders* sont espacés de 2 sauts. Un nœud *Gateway* est en charge de l'interconnexion des deux ou plusieurs nœuds Chefs (*Leaders*) (voir figure 2.2).

Les *Leaders* diffusent périodiquement des messages pour annoncer leurs présences. Un nœud, détectant un *Leader* dans son voisinage, s'attache à lui. Une fois attaché à un *Leader*, les communications entrantes et sortantes de ce nœud sont gérées par ce Chef(Leader).

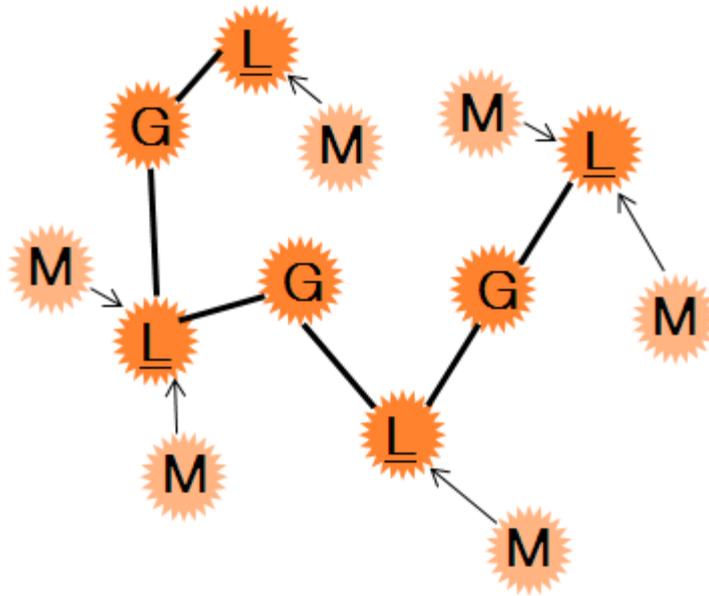


Figure2.3 : Topologie LEGOS

Une des différences principales avec les autres protocoles que l'on pourrait associer à l'auto-organisation est que LEGOS ne nécessite ni une reconstruction périodique ni une construction par vague : le gain en robustesse, latence, efficacité est alors important.

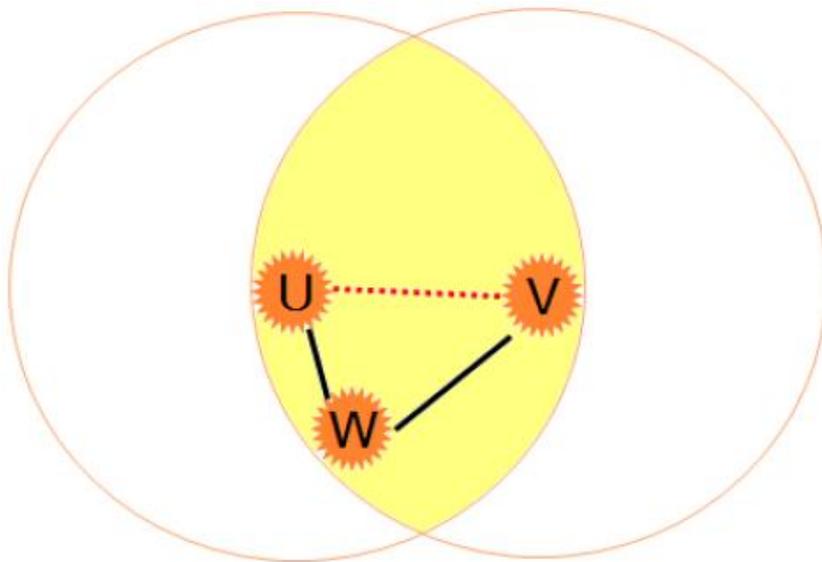
### 2.3 Auto-organisation basée sur l'élagage de liens

La deuxième famille de protocole d'auto-organisation est la famille des protocoles basés sur l'élagage des liens en s'appuyant sur l'ajustement de la puissance de transmission. Ces protocoles visent à éliminer les liens redondants et inutiles dans le réseau (voir figure 3.10). Les principaux protocoles d'auto-organisation basés sur l'élagage des liens sont : RNG (*Relative Neighborhood Graph*) et LMST (*Local Minimum Spanning Tree*). [WU 03], [LI 05], [TOU 80]

### 2.3.1 RNG (Relative Neighborhood Graph)

**Relative Neighborhood Graph (RNG)** est une famille de graphe proposée par Toussaint en 1980. L'idée est d'élaguer l'arête la plus longue dans chaque triangle dans le graphe.

Le RNG est basé sur la connaissance de la position de nœuds. En effet, chaque capteur connaît sa position et la diffuse à son voisinage direct. Grâce à la position de son voisinage à 1 saut, un nœud va désélectionner les liens les plus longs de la façon suivante : soit deux nœuds voisins  $u$  et  $v$ . S'il existe un nœud  $w$  tel que  $d(u, v) > d(u, w)$  et  $d(v, u) > d(v, w)$  avec  $d(u, v)$  la distance euclidienne entre les sommets  $u$  et  $v$  alors l'arête  $(u, v)$  est désélectionnée.



**Figure 2.4 :** Élagage des liens avec RNG.

La construction du graphe RNG se repose sur la connaissance du voisinage direct. Ainsi cette construction est basée sur un algorithme localisé. Celui-ci respecte les propriétés de connexité du graphe initial. En d'autres termes si le graphe initial est connexe alors le graphe RNG l'est également.

### 2.3.2 LMST (Local Minimum Spanning Tree)

Les algorithmes du *Minimum Spanning Tree* (MST) ont été largement utilisés pour la diffusion dans le réseau et pour le routage. Cependant, la détermination du MST nécessite une connaissance complète de la topologie du réseau. Cette connaissance ne peut pas être

envisagée dans les réseaux WSNs ou les WSANs. Une autre version de MST locale (*Local MST* ou LMST) a été proposée dans laquelle chaque nœud détermine localement un ST sur son voisinage à deux sauts. Pour cela, les nœuds doivent s'échanger des paquets « *Hello* » contenant la liste des voisins directs. Si deux nœuds sont voisins dans leurs topologies logiques de MST respectives, alors l'arête entre les deux nœuds est ajoutée dans le sous-graphe du LMST. Il est à souligner que le sous-graphe résultant n'est pas un arbre. Il existe des boucles à cause de l'exécution localisée de l'algorithme.

LMST est un sous-graphe de RNG. La topologie LMST préserve la connexité du graphe initial aussi.

## 2.4 Clustering

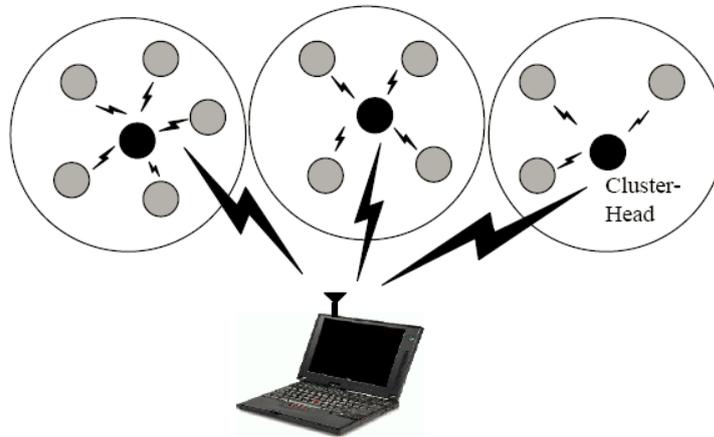
Les réseaux de capteurs sans fil sont fortement influencés par la limitation de la ressource énergétique disponible au niveau de chaque nœud. Actuellement, les principaux travaux de recherche dans ce domaine portent sur la prolongation de la durée de vie du réseau, via la conception de nouveaux protocoles de routage. Divers mécanismes peuvent intervenir en vue de l'optimisation de la consommation d'énergie lors de la transmission des données captées vers l'utilisateur final. L'auto-organisation en clusters du réseau s'est présentée, dans ce contexte, comme une approche de routage qui contribue d'une manière efficace à l'économie d'énergie, mais aussi à la réduction des messages de contrôle, ainsi qu'à l'augmentation de la réutilisabilité de la bande passante et l'attribution de ressources dans le réseau.

Dans ce chapitre nous allons présenter une classification des protocoles d'auto-organisation puis nous détaillerons ces derniers et nous clôturons ce chapitre par leur évaluation.

### 2.4.1 LEACH (*Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy*)

C'est un protocole auto-organisateur basé sur le clustering adaptatif, qui utilise la rotation randomisée des têtes de grappe pour distribuer équitablement la charge d'énergie entre les nœuds capteurs dans le réseau. Il est considéré comme étant l'une des premières approches de routage hiérarchique basées sur le clustering. LEACH est fondé sur deux hypothèses de base [HEI 00].

- la station de base est fixe et est placée loin des capteurs.
- Tous les nœuds du réseau sont homogènes et limités en énergie.



**Figure2.5** : Algorithme de routage (LEACH)

L'idée derrière LEACH est de former des clusters des nœuds capteurs selon la force reçue du signal et d'utiliser les têtes locales de grappe (cluster head) comme des routeurs pour conduire des données à la station de base. Les dispositifs principaux de LEACH sont :

- Coordination et contrôle localisés pour l'initialisation et le traitement de grappe.
- Rotation randomisée de la grappe (effectuée par "les stations de base" ou "les têtes de cluster").
- Compression locale (agrégation) Les nœuds CH compressent les données arrivant des nœuds appartenant à leurs grappes respectives, et envoient un paquet d'agrégation à la station de base afin de réduire la quantité d'information qui doit être transmise à la station de base.

Dans LEACH, le traitement est séparé dans des cycles de longueur constante, où chaque cycle commence par une phase d'initialisation suivie d'une phase de transmission. La durée d'un cycle est déterminée. Dans la première phase, les grappes sont organisées et les CHs sont sélectionnés. Cette élection est basée sur le pourcentage désiré de CHs et le nombre d'itérations au cours duquel un nœud a pris le rôle de CH. Ainsi, un nœud  $n$  prend une valeur aléatoire entre 0 et 1. Si cette valeur est inférieure au seuil  $T(n)$ , le nœud se déclare CH. La valeur du seuil  $T(n)$  est définie par la fonction suivante :

$$T(t) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P \times (r \bmod \frac{1}{P})} & \text{Si } (n \in G) \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$$

Avec :

$P$  : pourcentage désiré de CHs.

$r$  : itération actuelle.

$G$  : ensemble des nœuds qui ont été sélectionnés comme CH durant les dernières  $(1/P)$  itérations.

Chaque CH élu émet un message de signalisation au reste des nœuds dans le réseau, et qui présentent les nouveaux leaders. Tous les nœuds non leaders, et après avoir reçu ce message, décident de la grappe à laquelle ils veulent appartenir. Cette décision est basée sur la force du signal du message. Les nœuds non leader informent les leaders appropriés qu'ils seront un membre de la grappe.

Après la réception de tous les messages des nœuds qui voudraient être inclus dans la grappe et être basés sur le nombre de nœuds dans la grappe, le nœud leader crée un programme

TDMA et assigne à chaque nœud un slot de temps quand il peut transmettre. Ce programme est émis à tous les nœuds dans la grappe.

L'algorithme LEACH utilise la technique de multiplexage temporel TDMA (Time division multiplexed access) comme méthode d'accès au médium. Chaque nœud utilise la totalité de la bande passante allouée par le système de transmission durant son slot de temps. En fait, chaque CH agit comme un centre de commande local pour coordonner les transmissions des données dans sa grappe. Il crée un modèle de communication en se basant sur TDMA, ensuite il le transmet aux nœuds de sa grappe (cluster). Etant donné que chaque nœud connaît d'avance le slot de temps qu'il va occuper, cela permet alors au nœud de passer à l'état "endormi" durant les slots inactifs. Ainsi, la perte d'énergie due aux états de sur écoute (overhearing) et d'écoute passive (idle) est évitée.

Chaque CH choisit aléatoirement un code dans une liste de codes de propagation CDMA, il le transmet aux nœuds appartenant à son cluster afin de l'utiliser pour leurs transmissions, ceci afin de minimiser les interférences entre les messages des CHs les plus proches.

Dans la deuxième phase, le transfert des données actuelles à la station de base a lieu. La durée de la deuxième phase est plus longue que celle de la première phase afin de réduire au minimum les problèmes d'overheading. Cependant, la collection de données est centralisée et est exécutée périodiquement. Par conséquent, ce protocole s'avère le plus approprié quand on constate un besoin de surveillance de constante par le réseau de capteurs.

Après un intervalle de temps donné, une rotation randomisée du rôle du CH est conduite de sorte que la dissipation uniforme d'énergie dans le réseau de capteurs soit obtenue. Les auteurs ont trouvé, en se basant sur leur modèle de simulation, que seulement 5% des nœuds ont besoin d'agir comme leaders.

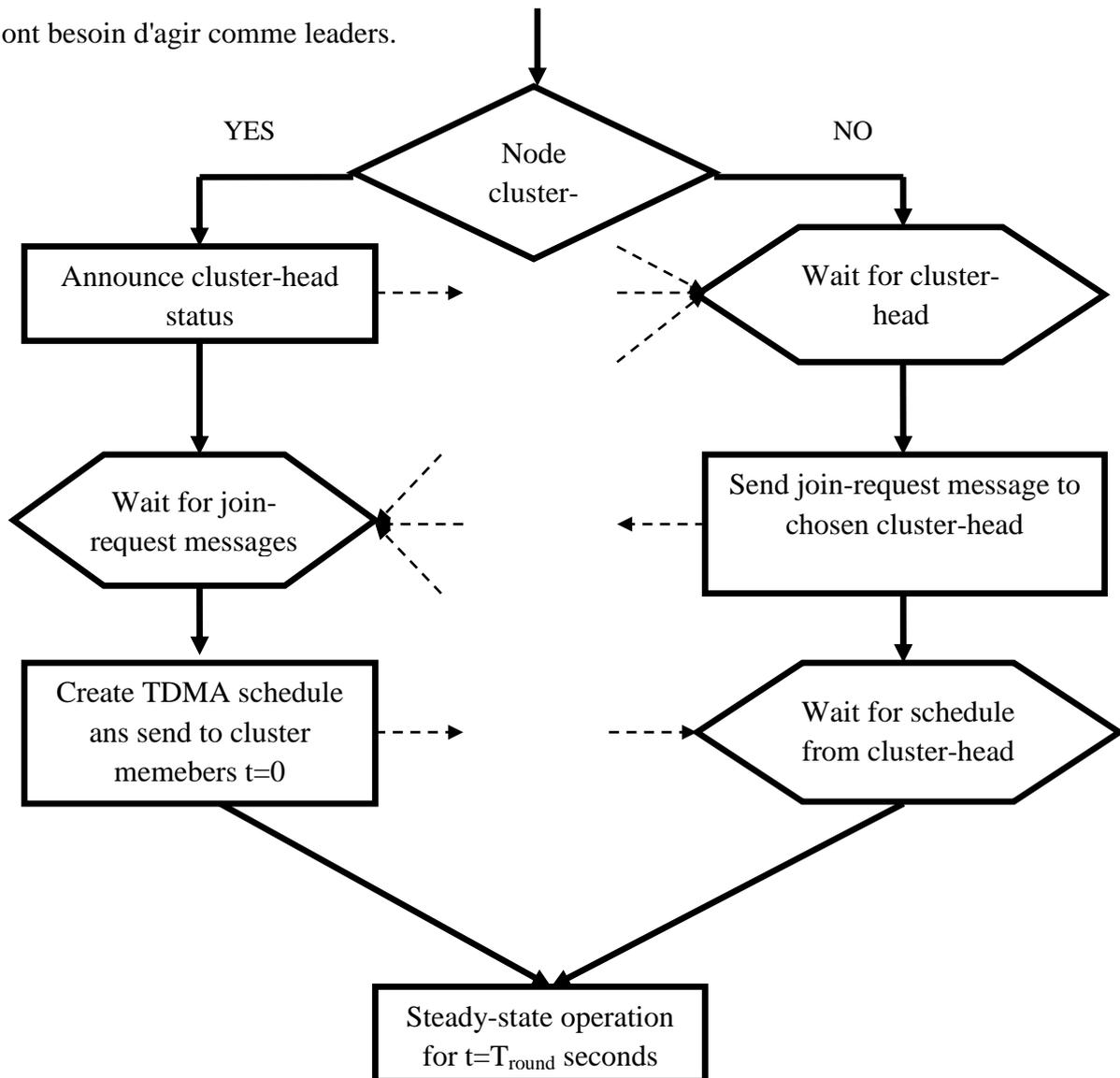


Figure2.6 : Opérations de la phase d'initialisation

Malgré les performances du protocole LEACH, il présente quelques insuffisances, on cite parmi eux : -Les nœuds les plus éloignés du CH meurent rapidement par rapport à ceux plus proches.

- Le nombre de messages reçus par les CHs équivaut, approximativement, celui des nœuds gérés. Ceci mène à l'épuisement rapide de leur réserve d'énergie ;
- L'utilisation de singel-hop (un saut) au lieu de multi-hop (multi sauts) épuise rapidement l'énergie des nœuds et consomme d'avantage de largeur de bande.
- LEACH suppose que tous les nœuds peuvent transmettre avec une énergie assez suffisante pour atteindre la BS si nécessaire. Ce qui n'est pas toujours le cas.
- Station de base stationnaire peut s'avérer peu judicieuse.

### **Les variantes de LEACH**

Le protocole LEACH peut produire des clusters possédant une taille importante dans les réseaux denses et des clusters dont la taille est limitée dans les réseaux de petites tailles. Dans ces deux cas, les cluster-Heads pourraient rapidement épuiser leur puissance de batterie. Dans les réseaux denses, les cluster-Heads coordonnent entre plusieurs membres des clusters alors que dans les réseaux de petites tailles, les cluster-Heads sont placés loin de la station de base ce qui nécessite des transmissions de forte puissance.

M-LEACH (Multi-hop LEACH) est une version améliorée de LEACH, dans laquelle les membres d'un cluster peuvent être à plus d'un saut de leur cluster-Head correspondant et communiquent avec lui en mode multi-saut. Ainsi, M-LEACH améliore le mode de communication (de 1saut à multi-sauts) [RAJ 11].

Une autre variante de LEACH appelée LEACH-C a été conçue pour améliorer les performances de LEACH. Cette variante utilise une architecture centralisée pour choisir les cluster-Heads tout en impliquant la station de base et l'information de localisation des capteurs

[HEI 00].

D'une manière similaire à LEACH-C, BCDP (Base-Station Controlled Dynamic Clustering Protocol) implique le niveau d'énergie des capteurs envoyé à la station de base pour construire des clusters homogènes durant la phase d'installation (première phase) [MUR 05].

### 2.4.2 HEED (*Hybrid Energy Efficient Distributed clustering*)

HEED s'exécute d'une manière distribuée comme LEACH a la différence du mode d'élection des CHs ou il utilise une formule qui fait intervenir l'énergie et le cout de la communication. Ainsi, seuls les nœuds ayant une énergie résiduelle plus importante peuvent devenir des CHs. [YOU 04]

HEED est caractérisé par:

- meilleure distribution des CHs sur le réseau, car la probabilité que deux nœuds adjacents deviennent CH en même temps, est minime a la différence de LEACH;
- consommation d'énergie est différente d'un nœud a un autre;
- probabilité d'élire un CH peut être ajustée pour assurer une connectivité inter-CH avec un rayon de transmission prédéfini.

L'algorithme HEED s'exécute en trois phases:

#### - Initialisation

L'algorithme fixe un seuil  $C_{prob}$  pour limiter le nombre initial des CHs car chaque nœud du réseau calcule une probabilité  $CH_{prob}$  pour devenir CH par la formule suivante:

$$CH_{prob} = C_{prob} * \left( \frac{E_{Résiduel}}{E_{Max}} \right)$$

Où

$E_{Max}$  Est l'énergie initiale du nœud et  $E_{Résiduel}$  est l'énergie restante.  
 $CH_{prob}$  Est toujours supérieure a un seuil  $P_{min}$  inversement proportionnel a  $E_{Max}$

#### - Phase répétitive

Chaque nœud du réseau et après plusieurs itérations choisi son CH qui minimise le cout de transmission. Si aucun CH n'est entendu, il se déclare CH et annonce sa décision; et pour que l'algorithme converge le nœud double son  $CH_{prob}$  à chaque nouvelle itération

jusqu'elle devienne égal à 1. De cette façon, le nœud est soit dans un état « Tentative stratus » si  $CH_{prob} < 1$ , soit il est dans un état « Final Statuts » si  $CH_{prob} = 1$ .

#### – Phase finale

Chaque nœud décide définitivement de son statut; il est soit membre du cluster avec un cout minimal, soit il est CH.

### Discussion

Le protocole HEED, en considérant l'énergie comme facteur pour l'élection des CHs, vise à prolonger la durée de vie du réseau; quoique, la formation des clusters a un saut risque de générer un nombre important de clusters si le nombre de nœuds est important. Ainsi, on se rapproche d'une topologie plate de réseau. En plus, HEED prévoit aussi, une communication directe entre les CHs et la station de base ce qui oblige les CHs lointains à dépenser plus d'énergie et par conséquent HEED est considéré comme un protocole non favorable au passage à l'échelle.

#### 2.4.3 EECS (Energy Efficient Clustering Scheme)

EECS est une nouvelle technique pour l'élection des CHs et la formation de clusters. Selon cette technique, les CHs candidats doivent rentrer en concurrence pour devenir des CHs. Ces CHs candidats sont choisis parmi les nœuds du réseau selon une probabilité prédéfinie. Dans la phase d'élection de CHs, un nombre constant de CHs candidats est déterminé. Par la suite ces CHs candidats diffusent des messages à leurs voisins via le support radio selon leur rayon de compétition, annonçant ainsi leurs volontés de devenir des CHs. A la fin, le CH ayant plus d'énergie résiduelle est choisi.

La formation des clusters adoptée par ce protocole est bien différente que celle de LEACH. Avec EECS chaque nœud choisi le cluster auquel il va se joindre selon deux paramètres : la distance qui le sépare du CH, et selon la distance qui sépare le CH de la station de base. Les tailles des clusters seraient dynamiques, et donc ce protocole permet de construire des groupes qui ont un éventail plus large dès qu'on s'éloigne de la station de base. Par conséquent, ces groupes vont exiger plus d'énergie pour la transmission de données que ceux, qui sont plus proches de la station de base [MEY 02].

## Discussion

Ce protocole permet d'utiliser des tailles dynamiques pour les clusters. Il offre une faisabilité similaire à celle de LEACH en termes de mécanisme de recouvrement, avec une meilleure utilisation d'énergie dans le réseau et donc assurer une meilleure connexion. D'ailleurs, les résultats de simulation d'EECS ont présentés de meilleures performances que LEACH, en termes de conservation d'énergie et prolongation de la durée de vie du réseau.

Mais malgré ça, on peut rapprocher à ce protocole sa méthodologie de communication employée pour router les données à la station de base. Généralement un seul saut est utilisé. Ceci consomme beaucoup d'énergie par les nœuds distants pour atteindre la station de base.

### 2.4.4 EEUC (An Energy-Efficient Unequal Clustering Mechanism for Wireless Sensor Networks)

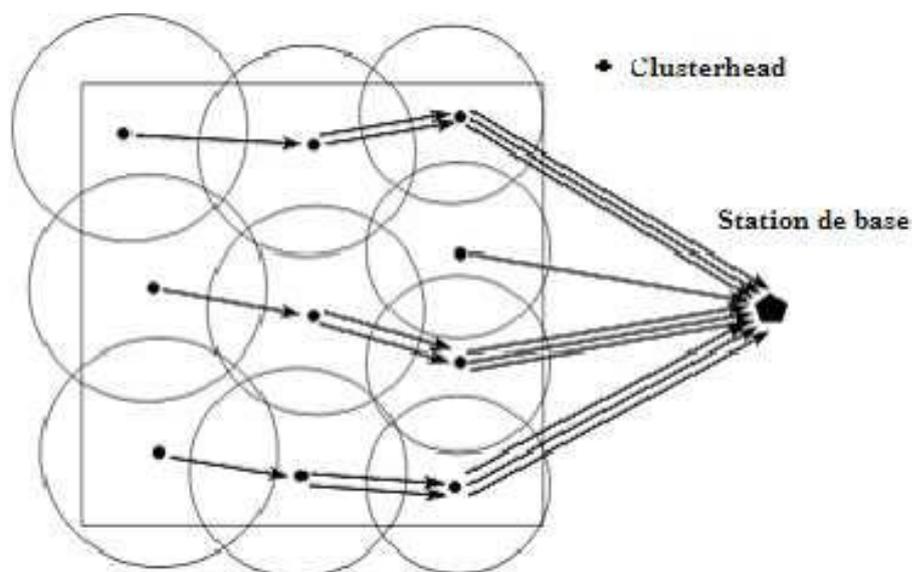
Le protocole EEUC aborde le problème des points chauds 'hot spot': les CHs qui entourent la station de base vont mourir plus vite que les autres CHs, car tout le trafic du réseau destiné à la station de base passe par ces nœuds et donc ont plus de charge que les nœuds distants, en particulier lors de l'adoption du routage multi-sauts comme mécanisme de transmission. L'idée principale derrière EEUC est d'utiliser un mécanisme de partitionnement de taille inégale pour grouper les nœuds lors du processus de clustering afin d'équilibrer la consommation d'énergie des CHs, et résoudre le problème des points chauds. Pour ce faire, les clusters les plus proches de la station de base ont des tailles plus petites que ceux qui sont plus loin, ce qui va permettre une diminution de la charge des CHs entourant la station de base et donc leur offrir la possibilité de conservation d'énergie [CLI 05].

EEUC procède d'une manière concurrente pour choisir les CHs. Initialement, tous les nœuds ont la même probabilité pour devenir des CHs candidats, où chaque nœud tire un nombre aléatoire entre 1 et 0. Si le nombre tiré est inférieur à un certain seuil prédéfini  $T$ , le nœud s'endormira. Sinon, il devient CH candidat et diffuse par la suite un message de compétition pour annoncer sa décision. Ce message contient l'identité du nœud, le diamètre du rayon de concurrence et son niveau d'énergie résiduelle. Le diamètre du rayon de concurrence est calculé en fonction de sa distance à la station de base. La figure 2.6 illustre une topologie de clusters où les cercles représentent les différents diamètres de concurrence. En fonction de ces diamètres, une répartition contrôlée de CHs dans le réseau est exercée.

Dès qu'on s'éloigne de la station de base, le diamètre de rayon de concurrence ainsi que la taille des clusters sont augmentés (plus les CHs sont proches de la station de base plus la taille des clusters sera petite).

Au niveau de chaque CH candidat une liste de ses CHs candidats adjacents est maintenue. Les membres de cette liste sont utilisés dans la Figure 2.7. La décision de devenir CH final est faite en se basant sur le niveau d'énergie résiduelle, de sorte que le CH candidat doté de plus d'énergie résiduelle parmi ceux maintenu au niveau de la liste, prévaut. En cas d'égalité, le nœud de plus petite identité est choisi. Par la suite, le nœud gagnant (CH final) diffuse un message aux autres nœuds CHs candidats voisins concurrents pour les informer. Ces derniers se retirent et abandonnent la concurrence dès qu'ils reçoivent ce message.

Une fois les CHs finaux sont sélectionnés, ils diffusent des messages d'annonce à travers le réseau. Et selon la force du signal reçu, chaque nœud rejoint le cluster du CH le plus proche, tout en confirmant son appartenance par un message de jointure.



**Figure 2.7 :** Le mécanisme utilisé par EEUC.

## Discussion

EEUC réalise un équilibrage de la consommation d'énergie entre les CHs via la technique de formation de clusters adoptée; clusters plus proches de la station de base ont des tailles plus petites que ceux éloignés. De plus, à travers le mécanisme de routage multi-sauts

introduit une meilleure préservation de la ressource énergétique est offerte dans le réseau; moins d'énergie est consommée pour atteindre la station de base.

En contre partie, le fait de choisir les plus proches CHs adjacents est ceux dotés de plus d'énergie résiduelle comme nœuds relais lors du routage multi-sauts sans prendre en compte la taille des clusters dans la fonction du choix ni le nombre de fois que ces CHs ont été déjà choisi comme relais, pourraient causer beaucoup de charge supplémentaire a ces CHs ce qui épuise leurs batteries rapidement. Ainsi, le nombre de messages de communication généré dans le réseau est très élevé car les CHs relais ne sont responsables que du transfert de données vers la station de base ou vers d'autres CHs relais et donc aucune fonction d'agrégation de données issue des autres CHs n'est réalisée ce qui va augmenter le nombre de messages échangés dans le réseau. Comme solution possible : introduire des mécanismes d'agrégation de données au niveau des CHs relais pour diminuer le nombre et la taille des messages transférés vers la station de base.

#### 2.4.5 Le protocole de routage «TEEN et APTEEN»

Le protocole TEEN a été développé à partir de LEACH mais au contraire de LEACH qui est orienté temps, TEEN est quant à lui orienté événement.

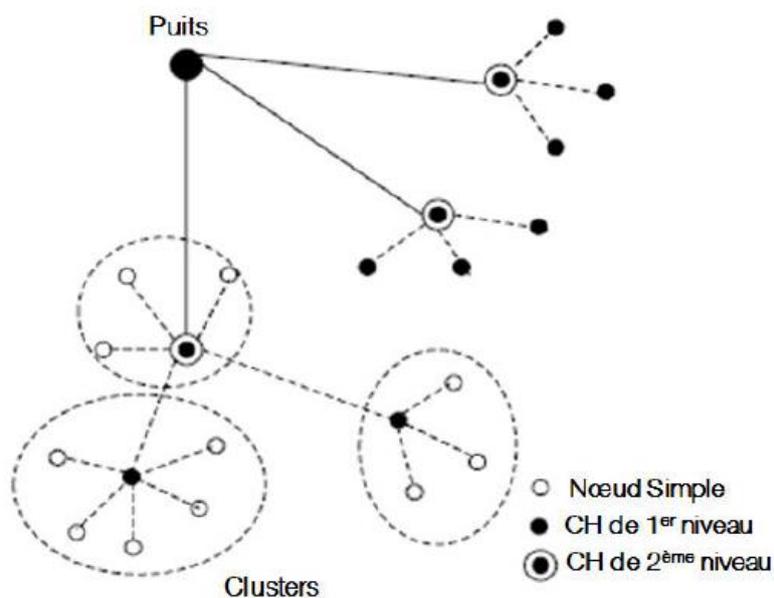
La différence majeure entre ces deux protocoles résulte dans le fait que TEEN n'utilise pas TDMA qui est inadapté pour les applications orientées événements. Les chefs de zones élus dans TEEN ne transmettent donc pas de *schedule TDMA* à leurs membres, mais un message qui contient la tâche demandée au capteur, la valeur critique après laquelle les membres doivent envoyer leurs rapports de données (Hard Threshold) et le changement minimal obligeant le nœud à envoyer un nouveau rapport (Soft Threshold).

Donc lorsqu'un nœud détecte que sa valeur captée a dépassé le HT, il doit émettre un rapport au chef de zone, mais uniquement si sa valeur a changé suffisamment (par rapport au ST). Le comportement est ainsi réactif (orienté événement) mais il limite également la consommation d'énergie. [XUE 10]

Pour remédier aux limitations du protocole TEEN, une extension de TEEN appelée APTEEN est proposée. APTEEN est un protocole hybride qui change la périodicité et les valeurs seuils utilisées dans TEEN selon les besoins de l'utilisateur et le type d'application. Dans APTEEN, les cluster-Heads transmettent à leurs membres les paramètres suivants :

- l'ensemble de paramètres physiques auxquels l'utilisateur est intéressé pour obtenir des informations (A),
- les seuils : seuil Hard HT et seuil Soft ST,
- un Schedule TDMA permettant d'assigner à chaque nœud un intervalle fini de temps appelé slot,
- un compteur de temps (CT) : c'est la période de temps maximum entre deux transmissions successives d'un nœud.

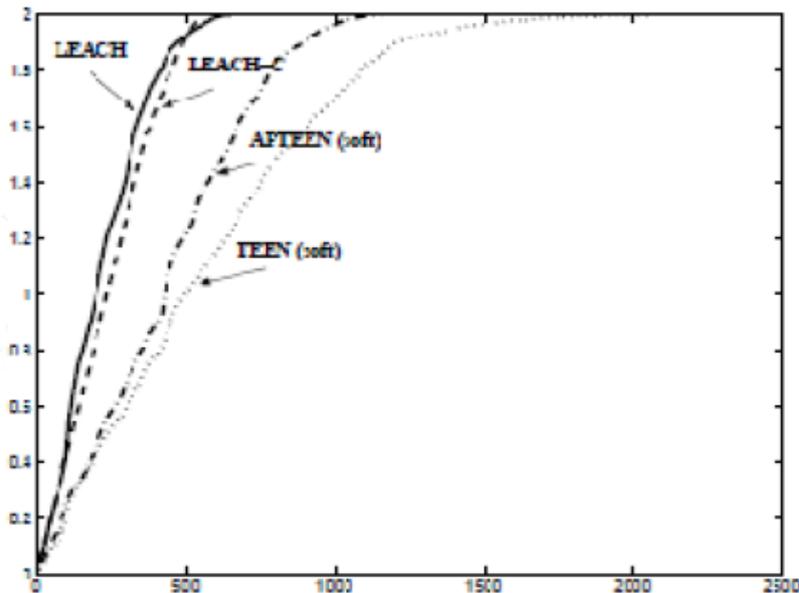
Dans APTEEN, les nœuds surveillent en continu l'environnement. Ainsi, les nœuds qui détectent une valeur d'un paramètre qui dépasse le seuil HT, transmettent leurs données. Une fois qu'un nœud détecte une valeur qui dépasse HT, il ne transmet les données au cluster head que si la valeur de ce paramètre change d'une quantité égale ou supérieure à ST. Si un nœud ne transmet pas de données pendant une période de temps CT, il devrait faire une capture de données et les retransmettre. APTEEN offre une grande flexibilité qui permet à l'utilisateur de choisir l'intervalle de temps CT, et les valeurs seuils HT et ST pour que la consommation d'énergie soit contrôlée par la variation de ces paramètres. Cependant, APTEEN nécessite une complexité supplémentaire pour implémenter les fonctions de seuils et de périodes de temps CT. Ainsi, le surcoût et la complexité associés à la formation des clusters à plusieurs niveaux par TEEN et APTEEN sont assez élevés. [MAN 03]



**Figure2.8** : Construction d'une hiérarchie multi-niveaux avec TEEN et APTEEN

## Discussion

La figure 2.8 indique une comparaison de protocole APTEEN avec TEEN et Leach (Leach et Leach-c) par rapport à la consommation d'énergie. Le protocole APTEEN se situe entre TEEN et LEACH en termes de consommation et la durée de vie du réseau.



**Figure 2.9** : l'énergie consommée (LEACH, APTEEN et TEEN)

Durant la détection de l'environnement, TEEN transmet les données seulement en temps critique. APTEEN fait une amélioration par rapport TEEN en soutenant un rapport périodique pour les événements de temps critique. Les principaux inconvénients de ces deux algorithmes sont la complexité et les frais généraux associés à la formation des clusters à plusieurs niveaux.

### 2.4.6 Le protocole LCH (Layered Clustering Hierarchy protocol)

C'est un protocole de Clustering basé sur une hiérarchisation en forme de couches dites LCH qui fixe comme objectif la conservation de l'énergie et la scalabilité du réseau WSN [WAN 09]

Dans le protocole LCH les nœuds sont organisés en couches selon leurs distances, en nombre de sauts, par rapport au puits; chaque couche exécute un algorithme distribué LEACH-like ou un nombre défini de Cluster-Heads est choisi. Ensuite, les nœuds non CH choisissent leurs clusters en se basant sur le coût de la communication. Les nœuds CH reçoivent les données

envoyées par les membres de leurs clusters, les agrègent et les envoient vers la couche supérieure.

Une rotation des CH est effectuée pour équilibrer la consommation de l'énergie et garantir une durée de vie plus longue du réseau.

Les nœuds CHs sont choisis en se basant sur le calcul d'une probabilité  $p$  de la forme suivante :

$$p_j(t) = \begin{cases} \frac{K_i}{N_i - K_i * (r \bmod \frac{N_i}{K_i})} & : C_j = 1 \\ 0 & : C_j = 0 \end{cases}$$

Ou:

$K_i$  Est le nombre de CH dans la couche  $i$ ;

$N_i$  Est le nombre totale des nœuds sur la couche  $i$ ;

$r$  est le nombre de rounds passes;

$C_j(t)=0$  si le nœud  $j$  a été désigné comme CH dans les rounds les plus récentes.

Une fois le CH est choisi, il annonce son état en diffusant un message avec le maximum de la puissance de transmission pour attirer des nœuds membres. Ensuite, il attend les messages d'adhésion émanant des autres nœuds.

Par la suite, chaque nœud non CH choisi aléatoirement son cluster, parmi les 3 meilleurs CHs qui nécessitent le minimum d'énergie de communication. Si un nœud reçoit des annonces émanant des CHs d'autres couches, il rejoint ceux qui appartiennent à la même couche que lui.

Les nœuds CHs recevant des annonces des couches supérieures mettent à jour leurs informations afin de parvenir à les joindre. Après que les messages d'adhésion des nœuds soient reçus, chaque CH crée et diffuse une planification TDMA pour les membres de son cluster.

## Discussion

Le protocole LCH permet des performances meilleures que LEACH en éliminant la contrainte de la possibilité de communication directe entre le puits et l'ensemble des nœuds du réseau, en adoptant une communication en multi-sauts.

En plus, La réélection aléatoire du CH permet une meilleure distribution de la consommation de l'énergie. La simulation montre que plus de 70% des nœuds participent à la phase de Clustering et les nœuds qui ne participent pas (n'appartenant à aucun Cluster) peuvent jouer le rôle d'un Gateway. La simulation montre également que plus de 77% des clusters construits ont une taille entre 5 et 30 nœuds.

Cependant, le protocole LCH ne garantit pas une distribution homogène des nœuds CHs sur le réseau car il se base sur l'algorithme LEACH. Il n'accorde aucune considération à l'énergie des capteurs lors du choix des nœuds CHs ou bien lors de leurs réélections.

Il est à signaler que LCH donne de meilleurs résultats lorsque le réseau est d'une densité plus importante.

### 2.4.7 KOCA (K-hop Overlapping Clustering Algorithm)

C'est un algorithme original pour construire des clusters Overlapping (qui se chevauchent) pour renforcer la robustesse du réseau, et pour répondre à des problématiques spécifiques, à savoir, la transmission inter-cluster, la localisation des nœuds et la synchronisation temporelle.

La construction des clusters overlappings (chevauchement) d'une manière distribuée est un problème NP-difficile; l'heuristique KOCA résoud ce problème d'une façon aléatoire et distribuée. KOCA déclare être d'une complexité  $O(1)$  indépendamment de la taille du réseau [YOU 09].

Le problème de formation des clusters overlapping est formulé par KOCA comme une construction d'un ensemble de cluster heads  $\langle S \rangle$  qui satisfait trois conditions:

La couverture: chaque nœud est soit un CH ou a une distance de k-sauts d'un CH;

L'overlapping: pour chaque cluster, il existe au moins un autre cluster qui chevauche avec lui avec un degré  $\leq$  à un seuil  $\sigma$ ;

La connectivité: l'ensemble  $\langle S \rangle$  est connecté.

La solution la plus appropriée est de trouver un *Minimal K-Dominating Set* (MKDS); sauf qu'aucune solution exacte n'est disponible pour résoudre ce problème NP-difficile, ce qui explique l'utilisation de l'heuristique KOCA.

KOCA divise les nœuds, selon leurs rôles, en trois (03) types:

Nœud ClusterHead (CH): sauvegarde la topologie de son cluster, les informations sur les clusters voisins et les chemins pour les atteindre en utilisant une table (Adjacents clusters *AC\_table*) de la forme {CHID, BNL} (CHID: ID du cluster head, BNL: liste des nœuds BN pour atteindre ce cluster);

Nœud frontière (Boundary node BN): appartient à plusieurs clusters en même temps, il joue le rôle d'un Gateway entre clusters voisins.

Nœud simple (Normal Node): appartient à un et un seul cluster.

Chaque nœud contient une table *CH\_table* qui sauvegarde les informations sur les Cluster Heads joignables. Si la table contient plus d'une entrée, le nœud est considéré comme BN;

Chaque nœud du réseau devient Cluster Head avec une probabilité  $p$ , puis, broadcaste un message *CH\_AD*, de la forme {SID, CHID, HC} (SID: ID de l'émetteur, CHID: ID du CH, HC: nombre de sauts pour atteindre le CH), aux nœuds voisins à  $k$ -sauts, c'est le champ *HC* qui permet cela. Si un nœud ne recevant aucun *CH\_AD* au bout de  $t(k) + \delta$  ( $t(k)$ : temps de transmission d'un message au  $k$ -sauts,  $\delta$ : temps d'initialisation d'un nœud), se déclare CH.

Chaque nœud qui reçoit un message *CH\_AD* mis à jour sa table *CH\_table* en créant une entrée; si le message provient d'un cluster existant, on met à jour le nombre de sauts vers le CH (pour garder le lien le plus court). Par la suite, un message *JREQ* est envoyé vers le CH, de la forme {JREQ, RID, SID, CHID, nc, (CHID) 0..nc} (avec RID: récepteur du message, SID: ID du nœud qui souhaite joindre le cluster, et CHID: ID de CH responsable de ce cluster, *CHID0..nc*: le nombre de clusters que le nœud peut joindre).

## Discussion

L'algorithme KOCA permet une couverture et une connexion meilleures (robustesse) du réseau. Il peut contrôler la taille des clusters en variant le nombre de sauts  $k$ . Il est d'une complexité de l'ordre de  $O(1)$  indépendamment de la taille du réseau. Il génère des clusters équilibrés en taille. Ce qui permet une bonne distribution de charge sur les clusters.

Quoique, l'algorithme KOCA déclare contrôler le degré de l'overlapping en utilisant la probabilité  $p$ , la simulation a montré que ce degré dépend plus de rayon de transmission  $d$ , du nombre de sauts  $k$  et de la taille du réseau  $n$ . D'autre part, La probabilité  $p$  utilisée n'a pas de fonction exacte de calcul, elle est choisie d'une façon empirique selon la simulation.

Il est à noter que le nombre de clusters obtenu par KOCA est trois(3) fois plus grand, que dans le cas de MKDS utilisée comme référence. Malgré que, la simulation est effectuée dans un environnement sans contentions et sans erreurs ce qui représente des hypothèses loin d'être réalistes.

#### 2.4.8 EEHC (Energy Efficient Hierarchical Clustering)

EEHC est un protocole aléatoire avec un temps de convergence variable. Ce protocole s'exécute sur deux phases : initial et prolongée. Phase initial (appelée aussi clustering a un seul niveau) : chaque nœud s'annonce comme un CH, avec une probabilité  $p_1$ , aux autres nœuds voisins situés dans sa portée de communication. Ces CHs sont nommés les volontaires. Tous les nœuds qui sont à  $k$  sauts d'un CH reçoivent cette annonce, soit par communication directe ou par retransmission. N'importe quel nœud qui reçoit un tel message et qui n'est pas un CH, s'affilie au plus proche CH et devient un nœud membre dans son cluster. Si l'annonce ne parvient pas à un nœud au bout d'un intervalle de temps pré-régulé et calculé en fonction de la durée d'un paquet pour atteindre un capteur à  $k$  sauts, ce nœud qui n'est pas CH et qui n'est à la portée d'aucun des CHs volontaires et ni membre d'aucun cluster est forcé à être CH.

Phase prolongée: le processus de clustering est prolongé afin de permettre la construction de plusieurs niveaux, c'est-à-dire la structuration de  $H$  niveaux d'hierarchie. Les CHs répètent récursivement l'exécution du processus de clustering afin de former un palier supplémentaire de clusters. Et pour transmettre les données à la station de base, ce protocole essaye d'assurer la connectivité en  $H$  sauts entre les CHs et la station de base.  $H$  est supposé comme le niveau le plus haut. Pour ce faire, EEHC procède comme suit : les nœuds capteurs transmettent les données collectées au CHs de niveau 1 (niveau le plus bas). Les CHs du niveau 1 transmettent à leur tour les données agrégées aux CHs de niveau 2 et ainsi de suite jusqu'au niveau le plus supérieur de la hiérarchie des clusters. Une fois arrivée, les CHs de haut niveau transmettront les rapports de données à la station de base. Cela permet à EEHC d'avoir une complexité temporelle de  $O(k_1 + k_2 + \dots + k_h)$ . Cette complexité est considérée comme amélioration

importante par rapport aux nombreux protocoles de clustering qui ont  $O(n)$  comme temps de convergence [DIL 09].

## Discussion

EEHC permet de conserver la ressource énergétique au niveau du réseau en réalisant une meilleure complexité temporelle, comparé aux autres travaux (voir RCC et CLUBS, protocoles détaillés plus tard, par exemple). Ce protocole essaye d'assurer un certain équilibrage de charge car chaque nœud dans le réseau a une chance de devenir CH. De plus, la communication réalisée par EEHC est meilleure qu'une communication directe avec la station de base. Cela est grâce à l'adoption de plusieurs sauts pour atteindre la station de base, ce qui permet d'économiser l'énergie lors de la communication des données. Il faut noter que la collecte des données et la transmission agrégée des rapports à la station de base dépendent des paramètres  $p$  et  $k$  adoptés par le protocole EEHC.

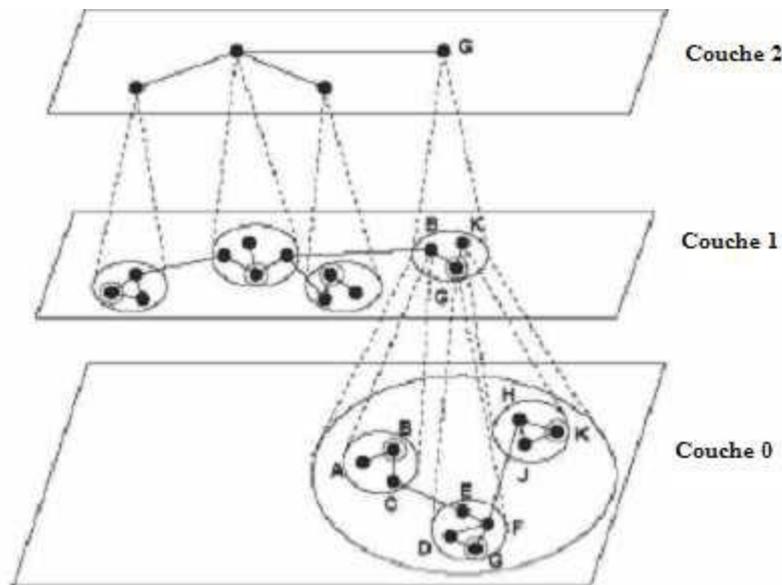
Cependant, le niveau de CHs a un impact direct sur l'énergie : plus le niveau est élevé plus la consommation d'énergie augmente car les CHs de hauts niveaux dépensent plus d'énergie pour la construction et la réexpédition des annonces. Par conséquent, les CHs de hauts niveaux mourront plus rapidement que les autres nœuds. En outre, lors d'appels fréquents pour la sélection du CH, le réseau en entier est instable et donc plus d'énergie est gaspillée pour l'entretien de la topologie et l'opération de maintenance s'avère un peu coûteuse.

### 2.4.9 HCC (Hierarchical Control Clustering)

À la différence de la plupart des travaux déjà vu, l'objectif de Hierarchical Control Clustering est la formation de plusieurs niveaux hiérarchiques de clusters ; clusters de clusters. La figure 2.10 illustre la notion d'hierarchie de clusters. Lors du processus de clustering, certaines propriétés utiles pour la gestion et la scalabilité de la hiérarchie tel que la taille du groupe et le degré de chevauchement sont prisent en considération.

D'après le schéma proposé, n'importe quel nœud dans le réseau peut lancer le processus de formation de clusters. Si plusieurs nœuds commençaient le processus de formation de clusters en même temps, le nœud initiateur avec le plus petit identifiant 'ID' sera favorisé.

Ce protocole procède en deux phases : arbre de découverte et formation de clusters.



**Figure 2.10 :** Hiérarchie de clusters.

La phase d'arbre de découverte est une formation distribuée selon BFS : Largeur-First-Search dont la racine est le nœud initiateur. Chaque nœud diffuse un signal, une fois tous les  $p$  unités de temps, annonçant des informations relatives aux sauts de plus courte distance à la racine. Dans le cas où un nœud voisin représente le plus court chemin vers la racine pour un autre nœud source, ce nœud voisin sera choisi comme parent et par conséquent le nœud source mettra à jour sa distance de saut vers la racine. Le signal de diffusion annonce des informations sur l'identité de source, ID de parent, ID de la racine, et la taille du sous-arbre. Ce dernier doit être mis à jour par chaque nœud quand la taille de ses fils change.

Quand un sous-arbre d'un nœud atteint un paramètre de taille  $k$ , la phase de formation de clusters est entamée. Alors, cette phase de formation de clusters est lancée par le nœud racine sur son sous-arbre. Un seul cluster est construit pour l'ensemble du sous-arbre, si sa taille est  $< 2k$ . Dans le cas contraire, de multiples clusters seront formés. Après la phase de création de clusters, le maintien des informations est crucial pour les clusters, ainsi que pour la maintenance des arbres BFS.

## Discussion

Hierarchical Control Clustering est généralement utilisé pour gérer des environnements dynamiques, par exemple : la présence de nœuds mobiles dans le réseau. Ce protocole permet de construire k-clusters limités par leur taille car la cardinalité de ces clusters à la fin de l'exécution du processus de clustering est compris entre k et  $(2 * k - 1)$ .

Cependant, l'échange excessif d'informations pour la formation ou le maintien des clusters consomme de l'énergie et limite la durée de vie du réseau. De même, la phase de construction de l'arbre recouvrant peut créer un trafic de contrôle important qui se répercute sur le temps de convergence du protocole.

## 2.5 Synthèse

Ci-dessous un tableau récapitulatif dont on fait une comparaison entre les protocoles cités précédemment :

propriétés protocoles	Hiérarchie	Types de nœuds	Election des Clusters Heads	Prédiction de nombre optimal de clusters
LEACH	1 saut	3 types : -Custer-Head -Base Station -noeuds	Probabilité p	5%
LEACH-M	multiple	3 types	idem	Aucune
LEACH-C	1 saut	3 types	idem	Aucune
BCDCP	1 saut	3 types	idem	Aucune
HEED	1 saut	3 types	P orientée énergie	Aucune
EECS	1 saut	3 types	Probabilité p	Aucune

EEUC	1 saut	3 types	Probabilité p	Aucune
EEHC	H sauts	H niveaux	Probabilité p	Aucune
KOCA	K sauts	- Custer-Head -nœud frontière -nœud simple	Probabilité p	Aucune
LCH	H sauts	H niveaux	Probabilité p	Aucune
HCC	H sauts	H niveaux	Probabilité p	Aucune
TEEN et APTEEN	1 saut	3 types : -Custer-Head -Base Station -noeuds	Probabilité p	Aucune

**Tableau2.1** : comparaison entre les protocoles de clustering.

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la notion d'auto-organisation notamment l'auto-organisation en clusters ou on a présenté les principaux protocoles de clustering et une synthèse de ces derniers.

# **Chapitre 3 : Nombre de clusters optimisant l'énergie**

### 3.1 Introduction

Le nombre de clusters Heads est un paramètre important dans les RCSFs hiérarchiques basé clusters. Les nœuds consomment plus d'énergie si le nombre de clusters Heads est trop grand ou trop petit.

Le protocole LEACH montre comment l'énergie consommée varie selon le pourcentage de clusters heads. il fixe le nombre optimal à un pourcentage de 5% sans se reposer sur un modèle théorique affirmant cette valeur.

Plusieurs auteurs ont essayé de proposer un modèle mathématique qui calcul ce nombre optimale.

Ce chapitre, présente une étude comparative entre trois travaux qui décrivent une méthode pour calculer le nombre optimal de Clusters-Heads (CH). ces travaux sont :

- A Distributed Topology Management Protocol for Wireless Sensor Networks. [HEN 10]
- A Clustering Algorithm of Cluster-head Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Energy. [BAI 11]
- Novel Method for Optimal Number of Cluster Heads in LEACH. [HON 09]

### 3.2 A Distributed Topology Management Protocol for Wireless Sensor Networks

Le protocole DEEP (Distributed Energy Efficient clustering Protocol) a pour but d'assurer une meilleure distribution de clusters et équilibrage de charge entre les nœuds du réseau.

#### 3.2.1 Le fonctionnement de DEEP

Le balancement de la charge est l'un des éléments fondamentaux pour prolonger la vie du réseau. Donc, le processus de clustering doit être déclenché périodiquement pour sélectionner un ensemble différent de CHs avec une grande énergie chaque cycle.

Au début, chaque nœud échange son ID et son énergie restante avec ses voisins locaux qui sont dans son rang de communication  $R$ , une fois que tous les nœuds acquièrent les informations d'énergie demandée à propos de ses voisins les plus proches, chaque nœud compare son niveau d'énergie actuel avec l'énergie restante de ses voisins. Les nœuds ayant un niveau haut d'énergie parmi ses voisins annonce qu'ils sont les CHs pour ce voisinage. Ensuite, les CHs attendent pour une période de  $t_w$  pour recevoir les messages

d'enregistrements (joins) de ses membres puissant. Les nœuds avec une énergie restante basse dans chaque voisinage attendent pour un temps de  $t_w$  pour recevoir tous les annonces de CHs. Une les annonces reçues les non-CH envoient les messages join-request vers le CH le plus proche.

Pour éviter le cas ou deux nœuds ayant une même énergie, le nœud qui a le plus haut nombre d'ID parmi les deux devient un CH alors que les autres attendent pour le rejoindre.

### 3.2.2 Le calcul du nombre optimal par DEEP

L'énergie consommée par l'amplificateur de transmission est proportionnel à la distance carrée entre le transmetteur et le récepteur,  $d^2$ , alors que l'énergie consommé dans la transmission de donnée à travers une longue distance (tel que d'un CH vers la station de base) est proportionnel à  $d^4$ . Utiliser ce modèle, l'énergie dépensée dans transmettre d'un 1-bit message à travers une longue distance,  $d$ , est :

$$E_{Tx} = lE_{elec} + l\epsilon_{2r}d^4 \quad (1)$$

Où :

$E_{elec}$  L'énergie électronique radio et  $\epsilon_{2r}$  est l'énergie d'amplificateur de transmission Pour le model de deux rayons. de même l'énergie dépensé lors de l'envoi de 1-bit message à travers une petite distance est donnée par :

$$E_{Tx} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2 \quad (2)$$

Où :

$\epsilon_{fs}$  Est l'énergie amplificateur de transmission Pour un model libre (free-space).

L'énergie consommée lors de la réception de 1-bit message est :

$$E_{Rx} = lE_{elec} \quad (3)$$

Durant la phase de transmission, les nœuds membre transmettent des messages data pour leurs CHs, et chaque CHs transmet un seul message agrégé vers la station de base dans chaque TDMA frame. Supposons une consommation d'énergie uniforme, l'énergie dépensée par CH est :

$$E_{CH} = l_{data}E_{elec} \left( \frac{N}{K} - 1 \right) + l_{data}E_c \left( \frac{N}{K} - 1 \right) + l_{data}E_{elec} + l_{data}\epsilon_{2r}d_B^4 \quad (4)$$

Où :

$N$  : est le nombre total de nœuds.

$K$  : Le nombre de cluster Heads

$l_{data}$  : Le nombre de bits dans un seul paquet.

$E_c$  : L'énergie d'agrégation de donnée.

$d_B$  : est le séparateur de distance entre le CH et la station de base. (Cela n'assume que chaque cluster a le même nombre de membres).

L'énergie consommée par chaque membre dans un cluster est estimée par :

$$E_{non-CH} = l_{data}E_{elec} + l_{data}\epsilon_{fs}d_c^2 \quad (5)$$

Où :

$d_c$  : est la distance des nœuds membre vers le CH.

Dans un champ  $A \times A$ , et assumer une distribution uniforme des clusters, chaque cluster occupe approximativement  $A^2/K$  ou  $\pi R^2$  avec la distribution des nœuds de  $p(x,y)$ , la distance carrée moyenne des nœuds à leur CH supposé être localisé au centre de ce champ est donnée par:

$$E[d_c^2] = \iint (x^2 + y^2) p(x,y) dx dy = \iint r^2 p(r, \theta) r dr d\theta \quad (6)$$

Supposons que le champ est un cercle avec un rayon  $R$  et  $p(r, \theta)$  est constant pour  $r$  et  $\theta$ , alors l'équation au-dessus devient :

$$E[d_c^2] = p \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^R r^3 dr d\theta = \frac{p\pi R^4}{2} \quad (7)$$

Pour une densité uniforme des nœuds dans un champ du cluster,  $p = 1/\pi R^2$ , la distance moyenne est simplifiée à :

$$E[d_c^2] = \frac{R^2}{2} \quad (8)$$

Utilisons la relation :

$$\frac{A^2}{K} = \pi R^2 \quad (9)$$

La distance moyenne entre les nœuds membre et leur CH est en rapport avec le nombre de cluster  $K$  comme suit:

$$E[d_c^2] = \frac{A^2}{2\pi K} \quad (10)$$

Par conséquent, l'énergie moyenne consommée par un nœud membre dans un cluster est:

$$E_{non-CH} = l_{data} E_{elec} + l_{data} \epsilon_{fs} \frac{R^2}{2} \quad (11)$$

L'énergie dépensée dans un seul cluster durant un TDMA frame est:

$$E_{cluster} = E_{CH} + \left(\frac{N}{K} - 1\right)E_{non-CH} \quad (12)$$

Et l'énergie totale a consommé par frame est:

$$E_{total} = KE_{cluster} \quad (13)$$

$$E_{total} = Nl_{data} \left( 2E_{elec} + E_c + \varepsilon_{fs} \frac{R^2}{2} \right) + Kl_{data} \left( \varepsilon_{2r} d^4 - E_c - E_{elec} - \varepsilon_{fs} \frac{R^2}{2} \right) \quad (14)$$

L'énergie totale dépensée augmente en fonction du nombre de frames, le nombre de clusters, le rayon de clusters, et la distance de CH vers la station de base.

L'énergie minimum dépensée est calculée de la manière suivante :

$$E_{total} = KE_{cluster} = Nl_{data} \left( 2E_{elec} + E_c + \varepsilon_{fs} \frac{A^2}{2\pi k} \right) + Kl_{data} \left( \varepsilon_{2r} d^4 - E_c - E_{elec} - \varepsilon_{fs} \frac{A^2}{2\pi K} \right) \quad (15)$$

en dérivant l'énergie totale consommée  $E_{total}$ , avec K mis- à zéro, le nombre optimal de clusters est:

$$K_{optimal} = \sqrt{\frac{N\varepsilon_{fs} \frac{A^2}{2\pi}}{d_B^4 \varepsilon_{2r} - E_c - E_{elec}}}$$

### 3.2.3 Discussion

Le modèle de communication radio utilisé pour le calcul d'énergie consommée par le transmetteur et le récepteur, ainsi que les deux modèles d'amplification du signal sont pratiquement les mêmes modèles adoptés par la majorité des auteurs. Ils sont modélisés par l'équation (1), (2) et (3).

la distribution des nœuds dans le réseau est considérée uniforme (à partir de l'équation (4) et (5)), cela veut dire que, si  $N$  est le nombre des nœuds dans le réseau, et  $K$  est le nombre de clusters Heads (CH), alors chaque cluster doit avoir  $\frac{N}{k}$  nœuds membres, ce que n'est pas toujours le cas, car le déploiement des nœuds capteurs sur le champ est la plupart du temps se fait d'une façon aléatoire, ce qui signifie qu'on peut prédire le nombre des nœuds par cluster que d'une manière aléatoire.

On analysant l'équation (4) on note les deux remarques suivantes :

$l_{data}$  Signifie le paquet de données, cela veut dire que l'énergie modélisée par cette équation concerne uniquement la phase de communication de données, et ne prend pas en compte la phase d'organisation en cluster ou les paquets du contrôle sont échangés.

La réception de données et son agrégation se fait  $(\frac{N}{K} - 1)$  fois (les nœuds membres d'un cluster excepté le CH), ce qui signifie que le CH ne reçoit pas une donnée de lui-même (ce qui est logique), et n'a pas de donnée à agréger et donc ne participe pas à la capture du phénomène ce qui n'est pas toujours le cas.

L'équation (6), représente l'espérance de la moyenne de la distance au carré qui sépare un nœud de son CH tout en supposant que chaque région occupée par un cluster est un cercle du centre CH et du rayon  $R$ . Cette formule n'est donc valable que si le CH est au centre de son cluster. Par contre la distance entre un CH et la station de base (BS), n'est pas calculée (elle est prise comme constante et sa valeur est donnée lors de la simulation). L'équation (8) est aussi obtenue en supposant que les nœuds d'un cluster sont distribués uniformément (la densité  $p = 1/\pi R^2$ ).

Selon la formule finale qui calcule le nombre optimal du CH (l'équation (15)), ce dernier change en fonction de nombres de nœuds( $N$ ), la taille du champ et la distance entre un CH et la station de base.

Selon les auteurs, la phase de clustering consomme moins d'énergie par rapport à la phase d'agrégation et la transmission du résultat à la station de base, donc elle peut être négligée, hors lors de cette phase, les communications (couteuse en énergie) en échangeant les paquets de contrôle ont eu lieu.

### **3.3 A Clustering Algorithm of Cluster-head Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Energy**

Le protocole (LEACH-E ; clustering algorithm of cluster head optimization for WSN based energy) a pour but d'optimiser la sélection des CH (en introduisant l'énergie dans le

calcul du seuil ) ainsi que le nombre optimal de CH et supprimer la probabilité qu'un nœud d'énergie basse puisse être élu comme CH et prolonge la durée de vie du réseau.

### 3.3.1 Le modèle énergétique utilisé par LEACH-E

#### Modèle radio utilisé pour le calcul de l'énergie dépensée

Le modèle de communication radio utilisé est :

1. La formule de l'énergie dépensée lors de la transmission de  $l$  bits est :

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\varepsilon_{fs}d^2, & d > d_0 \\ \text{et} \\ lE_{elec} + l\varepsilon_{mp}d^4, & d \leq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$E_{Tx-elec}$  est l'énergie électronique de la transmission

$E_{Tx-amp}$  L'énergie de l'amplification du signal :

La distance entre un CH et la BS (station de base) étant longue, le modèle d'amplification utilisé est le multi-path ( $d^4$ ).

Le modèle d'amplification utilisé pour modéliser la distance entre un non-CH et son CH est free-space ( $d^2$ ).

2. La formule de l'énergie dépensée lors de la réception de  $l$  bits est :

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = lE_{elec} \quad (2)$$

Où :

$E_{Rx-elec}$  L'énergie électronique de la réception.

### 3.3.2 Calcul du nombre optimal par LEACH-E

Selon le modèle radio utilisé, durant un cycle de transmission de 1 bits de données, l'énergie consommée par un CH consiste en 3 étapes :

- L'énergie dépensée lors de la réception des données de ses membres.
- L'énergie dépensée lors de l'agrégation de ces données.
- L'énergie consommée lors de l'envoi du résultat d'agrégation à la station de base.

Ces étapes sont modélisées par la formule suivante :

$$E_{CH} = lE_{elec}N_1 + lE_{DA}(N_1 + 1) + lE_{elec} + l_{mp}d_{toBS}^4 \quad (3)$$

Sachant que :

$l$  Le nombre de bits par paquet de données.

$E_{DA}$  L'énergie dépensée en agrégation.

$N_1$  la variable aléatoire du poisson dénotant le nombre des membres d'un cluster.

La moyenne du nombre des membres d'un cluster est :

$$E[N_1|N = n] \approx E[N_1] = \lambda_0/\lambda_1 \quad (4)$$

Tel que :

$\lambda_0 = (1 - p)\lambda$ ,  $p$  est la probabilité qu'un nœud soit un CH.

$$\lambda_1 = p\lambda$$

$p = k/n$ ,  $n$  est le nombre de nœuds du réseau,  $k$  est le nombre de CH.

$\lambda$  : est la densité de tous les nœuds du réseau.

$\lambda_1$  : dénote la densité des CH.

$\lambda_0$  : dénote la densité des non-CH.

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_1$$

Les  $n$  nœuds sont distribués sur une région considérée carrée ( $A \times A$ ) :

$$n = \lambda * A$$

Supposons, que la station de base est localisée au centre de la région carrée, la distance moyenne entre un CH et la station de base sera donc :

$$E[D_1 | N = n] = \iint D_1 \cdot P_A dx dy = \int_{-a}^a \int_{-a}^a \sqrt{x^2 + y^2} \frac{1}{4a^2} dx dy = 0.765 \quad (5)$$

Tel que :

- $D_1$  La variable de la distribution de poisson qui dénote la distance entre un CH de coordonnées  $(x, y)$  et la station de base.
- $P_A$  La probabilité de la densité d'un CH.
- $a = 1/2 c$  ;  $c$  le coté du carré présentant le champ.

À partir de l'équation (4) et (5) l'équation peut être exprimée de la manière suivante :

$$E_{CH} = \frac{n-k}{k} lE_{elec} + \frac{n}{k} lD_A + lE_{elec} + 0.342a^4 l\epsilon_{mp} \quad (6)$$

L'énergie dépensée par un non-CH est modélisée par la formule suivante :

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs} d_{to CH}^2 \quad (7)$$

Où :

$d_{to CH}$  Est la distance entre un CH et un non-CH.

La moyenne de la somme de la distance entre un CH et un non-CH est modélisée comme suit :

$$E[L_1|N = n] \approx E[L_1] = \lambda_0/2\lambda_1^{3/2} \quad (8)$$

Ici,  $L_1$  est la variable de poisson dénotant la somme de la distance entre un non-CH et un CH.

La distance moyenne entre un non-CH et son CH est la suivante :

$$E[H_1|N = n] = \frac{E[L_1|N=n]}{E[H_1|N=n]} = 0.5 \left(\frac{k\lambda}{n}\right)^{-1} \quad (9)$$

$H_1$  Est la distance entre un non-CH et son CH.

À partir de l'équation (8) et (9), l'équation (7) devient :

$$E_{non-CH} = lE_{elec} + \frac{n}{4k\lambda} l\epsilon_{fs} \quad (10)$$

L'énergie totale consommée en un cycle par frame est :

$$E_{cluster} = lE_{CH} + N_1 E_{non-CH} \quad (11)$$

$$E_{total} = kE_{cluster} \quad (12)$$

Selon l'équation (6), (10) et (11), l'équation (12) devient :

$$E_{total} = l \cdot \left[ (2n - k)E_{elec} + nE_{DA} + 0.342a^2 k\epsilon_{mp} + \frac{n(n-k)}{4k\lambda} \epsilon_{fs} \right] \quad (13)$$

En calculant la limite de  $E_{total}$  quand  $k$  tend vers 0 on trouvera :

$$\frac{d}{dk} E_{total} = -E_{elec} + 0.342a^2 \varepsilon_{fs} = 0 \quad (14)$$

Où :

$$n = \lambda * A \quad \text{Et} \quad n = \lambda * 4a^2 \quad \text{Donc} : \lambda = \frac{n}{4a^2}$$

Le nombre optimal de clusters Heads  $K_{opt}$  est donc:

$$k_{opt} = \sqrt{\frac{na^2 \varepsilon_{fs}}{0.342a^2 \varepsilon_{mp} - E_{elec}}} \quad (15)$$

### 3.3.3 La sélection du CH par LEACH-E

Pour optimiser la sélection du CH, et équilibrer la dépense de l'énergie dans le réseau, LEACH-E introduit un seuil dépendant de l'énergie restante du nœud :

$$T(n) = \begin{cases} \frac{p_{opt}}{1 - p_{opt} * \left( r \bmod \frac{1}{p_{opt}} \right)} \frac{E_{residual}}{E_0} & n \in G \\ 0 & \text{autre} \end{cases}$$

$$p_{opt} = \frac{k_{opt}}{nr}$$

Où :

$r$  : Le cycle courant (round).

$G$  : L'ensemble de nœuds non élus dans le dernier  $1/p$  round.

$E_{residual}$  : L'énergie résiduelle (restante) du nœud.

$E_0$  : L'énergie initiale du nœud.

Selon cette formule, la probabilité qu'un nœud de haute énergie sera élu comme CH est augmentée.

### 3.3.4 Les phases du protocole LEACH-E

Ce protocole est divisé en trois étapes :

**Etape01** : la phase de sélection du CH

Un seuil  $T(n)$  est prédéfinie et ayant une valeur entre 0 et 1.

On attribue d'une façon aléatoire à chaque nœud un nombre entre 0 et 1 nommé  $\mu$ . Si  $\mu < T(n)$ , le nœud est élu comme CH.

**Etape02** : la phase de formation des clusters

Le nœud élu comme CH, diffuse un message : HEAD-AD informant les autres nœuds du réseau de son élection, puis un nœud non-CH envoie un message JOIN-CLUSTER pour le CH qu'il a choisi, de cette manière les clusters sont formés.

Les nœuds CH recevant les JOIN-CLUSTER messages ajoutent les nœuds destinataires dans leurs tables de routage, planifient un ordonnancement TDMA et le transmet à ses membres.

**Etape03** : la phase de communication des données

Les CH se mettent sous l'état d'écoute tandis que les nœuds non-CH se mettent en veille. Les nœuds non-CH se réveillent et envoient les données au CH dans leurs slot.

Le code CDMA est établi entre CH pour réduire l'interférence entre les CH voisins. Après que la réception soit terminée, le CH passe à l'agrégation des données et envoie de cette opération à la station de base. Tous les nœuds du réseau entre ensuite dans la phase d'élection de CH.

### 3.3.5 Discussion

Les formules (1) et (2) correspondent au modèle de communication radio utilisé, qui est le plus courant. Le nombre de nœuds par cluster, est une variable aléatoire du poisson, ce qui signifie que la distribution des nœuds du réseau n'est pas uniforme, ce qui correspond au déploiement réel des nœuds sur le champ (équation (3)).

La distance entre un CH et la station de base, et entre un CH et un nœud membre, sont aussi des variables aléatoires de poisson, donc la distribution des nœuds est aléatoire, et on connaît pas au départ, ni la distance  $d_{toBS}$  ni  $d_{toCH}$ .

La formule obtenue est essentiellement en fonction de nombre des nœuds du réseau et la taille de champ. la phase de formation de clusters est aussi ignorée lors de calcul de l'énergie dissipée par les nœuds du réseau.

### 3.4 Novel Method for Optimal Number of Cluster Heads in LEACH

En se basant sur le modèle de consommation d'énergie en LEACH, les auteurs ont arrivé à définir un modèle mathématique qui calcul le nombre optimale de clusters. Les résultats qu'ils ont obtenu de la simulation ont fait apparaitre une relation entre le nombre optimale de clusters, le nombre de séquences (frames) dans la phase steady- state du LEACH et la distance entre les CH et la station de base.

#### 3.4.1 Le modèle radio et réseau

Dans ce modèle, 100 nœuds ont été déployé entre  $(x=0, y=0)$  et  $(x=100, y=100)$ , avec la station de base localisée à  $(x=50, y=175)$ .

Le modèle utilisé pour le calcul de l'énergie lors de la transmission d'un message de  $l$  bits à une distance  $d$  est le suivant :

$$E_{Tx}(I, d) = E_{Tx-elec}(I) + E_{Tx-amp}(I, d) \quad (1)$$

$$E_{Tx}(I, d) = \begin{cases} l * E_{elec} + l * \varepsilon_{fs} * d^2, & d < d_0 \\ l * E_{elec} + l * \varepsilon_{mp} d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{Rx}(I, d) = E_{Rx-elec}(I) = I * E_{elec} \quad (3)$$

le modèle utilisé pour l'amplification du signal échangé entre un nœud cluster head (CH) et un non-CH est le free space ( $\varepsilon_{fs} * d^2$ ), et le modèle multi-path ( $\varepsilon_{mp} d^4$ ) est utilisé pour l'amplification du signal échangé entre un nœud cluster head (CH) et la station de base.

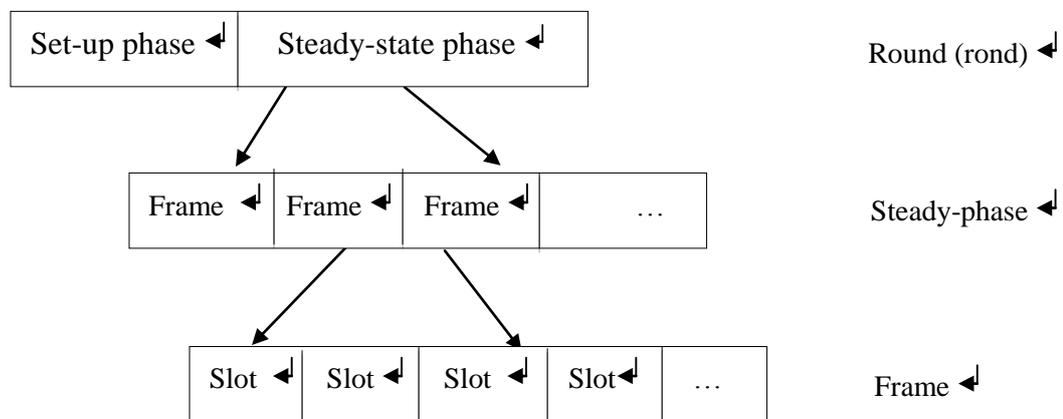
L'énergie électronique  $E_{elec}$  dépend des facteurs comme le codage numérique (la conversion analogique numérique), la modulation du signal, le filtrage et l'étendue du signal, tandis que l'énergie d'amplification de la distance entre le transmetteur et le récepteur.

On suppose que l'énergie dépensée entre un nœud A et B est la même que celle dépensée dans l'autre sens (de B vers A).

### 3.4.2 Le calcul de nombre optimal

Le processus de LEACH est divisé en cycles, chaque cycle débute par une phase de set-up (phase d'organisation en clusters), suivie d'une phase steady-state (état stationnaire où la réception des données, leurs agrégation, et leurs envoie à la station de base sont effectuées).

Chaque phase steady-state peut être divisée en séquences (frames) et chaque frame peut-être divisée en créneaux horaires (slots) comme montre la figure suivante :



**Figure3.1** : les phases d'un cycle en LEACH

Soit  $N$  le nombre total des nœuds du réseau distribués sur une région de surface  $M \times M$ , il y a  $K$  clusters et en moyenne de  $\frac{N}{K}$  nœuds par cluster.

Les auteurs calculent l'énergie dissipée tout au long du cycle en divisant la consommation d'énergie selon les deux étapes de protocole LEACH (la phase set-up et la phase steady-state).

lors de la phase set-up, le nœud CH consomme l'énergie lors de la transmission de messages ADV( cluster head ADVertissement) pour annoncer qu'il est élu comme CH, la réception des messages Join-Request de la part de ses voisins qui décident de le prendre comme chef, la création de et la transmission du l'ordonnancement TDMA (Time Division Multipl-Access) aux nœuds membres de cluster. La diffusion et la réception des messages

ADV est supposée en langue distance, tandis que la transmission et la réception des messages TDMA est en petite distance.

Le tableau suivant résume les opérations et l'énergie dissipée lors de la phase set-up de LEACH

Opérations		Energie dissipée
ADV	Transmission	$l * E_{elec} + l * \epsilon_{mp} d^4$
	Réception	$l * E_{elec}$
Join-Request	Transmission	$l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} * d_{toCH}^2$
	Réception	$l * E_{elec}$
Ordonnancement TDMA	Transmission	$l * E_{elec} + l * \epsilon_{fs} * d_{toCH}^2$
	Réception	$l * E_{elec}$
Création de l'ordonnancement TDMA		$l * E_{elec}$

**Tableau3.1** : l'énergie dissipée lors de la phase set-up

L'énergie consommée par un CH

$$E_{CH-set-up} = \frac{N}{K} (l_1 * E_{elec}) + l_1 * E_{elec} + \left(\frac{N}{K} - 1\right) l_1 * E_{sched} + l_1 * E_{sched} l_1 * \epsilon_{mp} d^4 + l_1 * \epsilon_{fs} * d_{toCH}^2.$$

$$E_{CH-set-up} = l_1 * E_{elec} \left(\frac{N}{K} + 1\right) + l_1 * E_{sched} * \frac{N}{K} + l_1 * \epsilon_{mp} d^4 + l_1 * \epsilon_{fs} * d_{toCH}^2 \quad (4)$$

Où :

$E_{sched}$  : Est l'énergie dissipée lors de l'ordonnancement (la création et la transmission).

$\frac{N}{K} - 1$  : est le nombre des membres de chaque cluster sans le CH.

L'énergie consommée par un non-CH

$$E_{\text{non-CH-set-up}} = 3l_1 * E_{\text{elec}} + l_1 * \varepsilon_{fs} * d_{\text{toCH}}^2 \quad (5)$$

L'énergie consommée par tous les nœuds à la phase set-up:

$$E_{\text{set-up}} = K * E_{\text{CH-set-up}} + (N - K) * E_{\text{non-CH-set-up}}$$

$$E_{\text{set-up}} = l_1 * (4N - 2K) * E_{\text{elec}} + l_1 * NE_{\text{sched}} + l_1 N * \varepsilon_{mp} d^4 + l_1 k * \varepsilon_{fs} * d_{\text{toCH}}^2 \quad (6)$$

Lors de la phase steady-state, le CH consomme une énergie en recevant les données de ses membres (de son cluster), l'agrégation de ces dernières puis l'envoi du résultat à la station d base. Un nœud membre du cluster consomme l'énergie lors de la transmission des données captées à son CH.

L'énergie consommée par un CH en une séquence (frame)

$$E_{\text{frame-CH}} = l_2 E_{\text{elec}} \left( \frac{N}{K} - 1 \right) + l_2 E_{DA} \frac{N}{K} + l_2 E_{\text{elec}} + l_2 * \varepsilon_{mp} d_{\text{toBS}}^4 \quad (7)$$

L'énergie consommée par un non-CH en une séquence (frame)

$$E_{\text{frame-non-CH}} = l_2 E_{\text{elec}} + l_2 * \varepsilon_{fs} * d_{\text{toCH}}^2 \quad (8)$$

L'énergie consommée par tous les nœuds en une séquence (frame)

$$E_{\text{frame-total}} = K E_{\text{frame-CH}} + (N - K) E_{\text{frame-non-CH}}$$

$$E_{\text{frame-total}} = l_2 * (2N - K) E_{\text{elec}} + l_2 N E_{DA} + l_2 (N - K) * \varepsilon_{fs} * d_{\text{toCH}}^2 + l_2 K \varepsilon_{mp} d_{\text{toBS}}^4 \quad (10)$$

L'énergie consommée par tous les nœuds dans la phase steady-state

$$E_{Steady-State} = E_{frame-total} * f \quad (11)$$

Tel que :

$f$  est le nombre de séquences (frames).

L'énergie dissipée par tous les nœuds durant un cycle (round)

$$E_{round} = E_{set-up} + E_{Steady-State} \quad (12)$$

$$E_{round} = l_1 * (4N - 2K) * E_{elec} + l_1 * NE_{sched} + l_1 K * \varepsilon_{mp} d^4 + l_1 N * \varepsilon_{fs} * d_{toCH}^2 * f * [l_2 * (2N - K) E_{elec} + l_2 N E_{DA} + l_2 (N - K) * \varepsilon_{fs} * d_{toCH}^2 + l_2 K \varepsilon_{mp} d_{toBS}^4] \quad (13)$$

Les auteurs supposent que chaque cluster forme un cercle de rayon  $\frac{M}{\sqrt{\pi K}}$ , le CH est au centre, la densité de la distribution du nœud est  $p(x, y)$  alors :

$$E[d_{toCH}^2] = \iint (x^2 + y^2) p(x, y) dx dy = \iint r^2 p(r, \theta) \quad (14)$$

Où :

$$p = \frac{1}{\left(\frac{M^2}{K}\right)} \quad (15)$$

$$E[d_{toCH}^2] = P \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{\frac{M}{\sqrt{\pi K}}} r^3 dr d\theta = \frac{1}{2\pi} \frac{M^2}{K} \quad (16)$$

Dans des circonstances normales le paquet de contrôle et de données n'est pas le même, d'où  $l_1 \neq l_2$ .

$$\lim_{k \rightarrow 0} E_{round} = \frac{dk}{dt} E_{round} = 0$$

Sachant :

$$d_{toCH}^2 = \frac{M^2}{2\pi K}, \text{ la dérivée de } d_{toCH}^2 \text{ par rapport à } k \text{ est donc égale à : } \frac{-M^2}{2\pi k^2}.$$

La dérivée de  $E_{round}$  par rapport à  $k$  est :

$$\begin{aligned} E_{round} &= -2l_1 * E_{elec} + l_1 N \varepsilon_{fs} * \frac{-M^2}{2\pi} * \frac{1}{K^2} + l_1 * \varepsilon_{mp} d^4 + f \\ &\quad * \left[ -l_2 * E_{elec} + l_2 * \varepsilon_{fs} * \frac{-M^2}{2\pi} * \frac{1}{K^2} + l_2 \varepsilon_{mp} d_{toBS}^4 \right] \\ E_{round} &= -2l_1 * E_{elec} - \frac{1}{K^2} \left( l_1 N \varepsilon_{fs} * \frac{M^2}{2\pi} + f \left( l_2 N * \varepsilon_{fs} * \frac{M^2}{2\pi} \right) \right) - f l_2 \\ &\quad * E_{elec} \quad f l_2 \varepsilon_{mp} d_{toBS}^4 + l_1 * \varepsilon_{mp} d^4 \\ E_{round} &= \varepsilon_{mp} (l_1 d^4 + f l_2 d_{toBS}^4) - (f l_2 + 2l_1) * E_{elec} - \frac{1}{K^2} \left( l_1 N \varepsilon_{fs} * \frac{-M^2}{2\pi} + \right. \\ &\quad \left. f \left( l_2 N * \varepsilon_{fs} * \frac{-M^2}{2\pi} \right) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} E_{round} = 0 &\leftrightarrow \frac{1}{K^2} \left( l_1 N \varepsilon_{fs} * \frac{-M^2}{2\pi} + f \left( l_2 N * \varepsilon_{fs} * \frac{M^2}{2\pi} \right) \right) = \varepsilon_{mp} (l_1 d^4 + f l_2 d_{toBS}^4) - \\ &\quad (f l_2 + 2l_1) * E_{elec} \end{aligned} \quad (18)$$

$$K^2 = \frac{(l_1 + f l_2) * N * \varepsilon_{fs} * \frac{M^2}{2\pi}}{\varepsilon_{mp} (l_1 d^4 + f l_2 d_{toBS}^4) - (f l_2 + 2l_1) * E_{elec}}$$

Le nombre optimal de clusters Heads  $K_{opt}$  est donc:

$$K_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{(l_1 + fl_2) * N * \epsilon_{fs} * M^2}{\left(2\pi(\epsilon_{\text{mp}}(l_1 d^4 + fl_2 d_{\text{toBS}}^4) - (fl_2 + 2l_1) * E_{\text{elec}})\right)}}$$

### 3.4.3 Discussion

Le modèle de communications radio utilisé, ainsi que le modèle d'amplification sont identiques aux deux articles précédents (équation (1), (2) et (3)).

La distribution des nœuds est supposée uniforme, ce qui signifie que chaque cluster a  $\frac{N}{K}$  nœuds, N est le nombre total des nœuds de réseau, k est le nombre de CH.

La dérivation de la formule du nombre optimal de CH s'est basée sur les deux étapes de protocole LEACH (tout le cycle ou round), la phase set-up et la phase steady-state

- $l_1 \neq l_2$ ;  $l_1$  est le paquet de contrôle,  $l_2$  est le paquet de données.
- Le message ADV étant envoyé par diffusion (broad-cast), le modèle d'amplification utilisé est le mutli-path, et le CH consomme de l'énergie comme ses membres (car il reçoit le message qu'il diffuse). Tandis qu'il ne fait pas partie de l'ordonnancement TDMA qu'il planifie pour ses membres (équation(3)).
- Lors de la phase steady-state, le CH reçoit les données de ses membres et ajoute sa propre donnée afin d'agréger ces dernières, et envoyer le résultat à la station de base (contrairement au premier article et conformément au deuxième).
- La formule de nombre optimal de CH dépend essentiellement de nombre de frames f et la distance entre les CH et la station de base.

### 3.5 Conclusion

Le modèle théorique définie pour le nombre optimal de CH diffère d'un auteur à un autre. D'une manière générale le calcul de l'énergie consommée par les nœuds du réseau est le même (à l'exception des étapes considérées, tout le cycle ou la phase de transmission de données).la plus grande différence réside en raisonnement sur la distribution des nœuds (aléatoire ou uniforme), et la distance qui sépare un nœud CH de la station de base et de ses membres (aléatoire ou fixe).

Du point de vue pratique, la deuxième formule est la plus raisonnable, car elle considère la distribution des nœuds dans le réseau ainsi que la distance  $d_{\text{toCH}}$  et  $d_{\text{toBS}}$  est aléatoire, qui est

une particularité des réseaux de capteurs sans fils. Cette formule peut être améliorée en prenant en compte de l'énergie dissipée lors de la phase d'organisation en clusters et en incluant le cas de distribution uniforme des nœuds dans le réseau (sous certaines conditions) qui est totalement absente selon le raisonnement opté par ces auteurs.

Le tableau suivant, est un récapitulatif des trois formules analysées en exposant leurs points communs, ainsi que leurs caractéristiques.

Formule	Protocole utilisé	Distribution des nœuds	La distance entre les nœuds	Modèle de communications radio utilisé	Les paramètres agissant sur la formule
Formule 01	DEEP	Uniforme	$d_{toBS}$ fixe $d_{toCH}$ calculée	$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-elec}(l) + E_{Tx-mp}(l, d)$ $E_{Rx}(l, d) = E_{Rx-elec}(l) = l * E_{elec}$	$d_{toBS}$ , $E_c$ , $E_{elec}$
Formule 02	LEACH-E	Aléatoire	Aléatoire	Le même	<b>N, A</b>
Formule 03	LEACH	Uniforme	Idem que 01	Le même	<b>F, <math>d_{toBS}</math></b>

**Tableau3.2 :** Comparaison entre les trois (3) articles.

### Remarque

$d_{toBS}$ : est la distance entre un CH et la station de base.

N : le nombre de nœuds.

A : la taille champ.

F : nombre de séquences (frame).

$E_c$  : l'énergie d'agrégation.

$E_{\text{elec}}$  : l'énergie électronique pour la réception ou la transmission des données.

# **Chapitre 4 : Evaluation des performances**

## 4.1 Objectifs

La simulation d'un système réel devient nécessaire dès lors que les modèles analytiques deviennent, soit trop complexes en termes de calcul et de temps de résolution, soit trop simples vis-à-vis de la réalité rendant, par ce fait, les résultats obtenus non représentatifs du comportement du système dans un environnement réel. Ainsi, la simulation peut s'avérer nécessaire dans les cas suivants :

- Le système n'est pas décomposable en sous-systèmes simples et indépendants l'un de l'autre, rendant une modélisation analytique très complexe.
- Le système n'existe pas encore. Dans ce cas, la simulation peut constituer une phase préliminaire, permettant aux concepteurs de prévoir le fonctionnement du système afin d'optimiser le dimensionnement de ses différents paramètres.
- Les expériences sur système réel sont trop coûteuses en termes de ressources matérielles et humaines.
- Les expériences sur système réel ne sont pas reproductibles ni représentatives de tous les environnements possibles. Dans ce cas, la simulation permet de caractériser le comportement global du système pour différents environnements.

## 4.2 Simulation dans les RCSFs

Actuellement, il y a de nombreuses plateformes de simulation de réseaux disponibles sur le marché qu'elles soient commerciales ou non pour évaluer le comportement d'un système complexe dont la formalisation à l'aide de méthodes analytiques est difficile. Pour tester les performances d'un réseau mobile on a souvent recours à la simulation.

En effet il serait trop coûteux, voire impossible, de mettre en place un réseau à des fins de test pour certains critères. Par exemple, tester des applications sur des réseaux de grande envergure n'est possible en réalité que si l'on dispose de moyens matériels importants. Cependant, dans le cadre d'une simulation, il suffit de changer les paramètres de simulation correspondant à la taille du réseau.

## 4.3 Quelques simulateurs utilisés pour les RCSFs

Les besoins croissants de tester les nouvelles technologies et les nouveaux protocoles avant leur déploiement a conduit à la prolifération des simulateurs. On peut les classer en

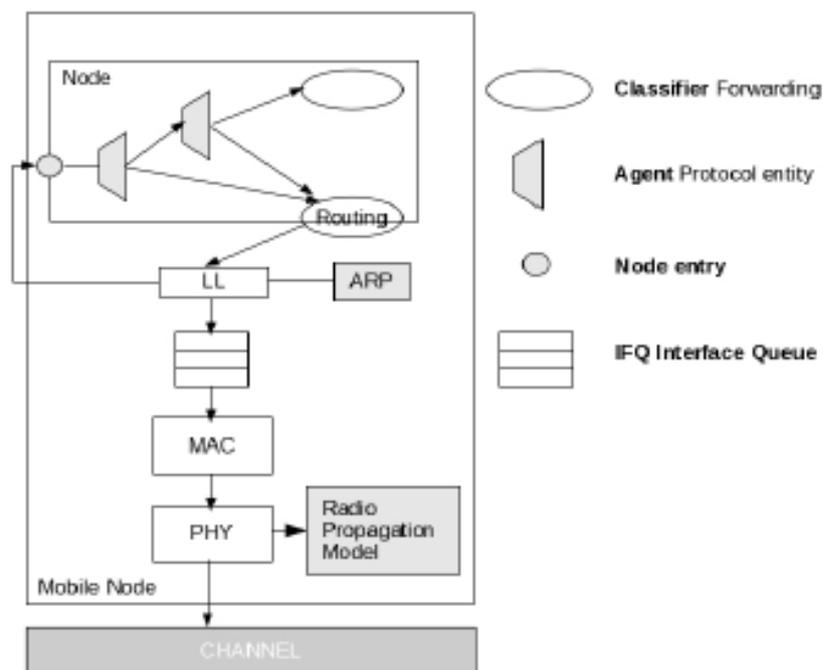
deux types: les logiciels libres et gratuits tels qu'OMNet++, J-Sim et NS2... et les logiciels commerciaux tels qu'OPNET et QualNet « la version commerciale de GloMoSim ».

Ces simulateurs offrent tous un environnement de programmation pour l'implémentation et l'évaluation des performances des protocoles de communication.

### 4.3.1 Le Simulateur NS-2

C'est un simulateur à événements discrets, écrit en C++ avec une interface TCL. Il est proposé dans le domaine des recherches sur les réseaux. Il est gratuit et open-source. Des améliorations sont en cours sur ns2 avec en parallèle le développement de NS3.

Les nœuds dans le simulateur NS2 modélisent des piles protocolaires OSI complètes qui ne sont pas nécessaires pour représenter des nœuds de capteurs. En effet, un ensemble de protocoles de routage fixe, des protocoles de transport et des modèles d'application (comme des services web) sont fournis mais ils ne sont pas utilisés par les réseaux de capteurs. Enfin, la simulation des réseaux de capteurs n'est pas facilement supportée par NS2 même si plusieurs travaux sont actuellement en cours pour que NS2 supporte mieux la simulation des réseaux sans fil. Notamment, [Xue et al. 2007] ont évalué la performance du simulateur NS2 dans le cadre des RCSFs. Ils ont montré que NS2 ne simule pas très bien les RCSFs. Aussi, ils ont proposé des modifications pour améliorer les modèles RCSFs sous NS2. [AHM11]



**Figure 4.1:** Architecture générale d'un nœud mobile dans NS-2

### 4.3.2 Le simulateur OPNET

OPNET Modeler est un simulateur de réseaux commercialisé par Opnet Technologies, Inc. Une interface utilisateur graphique supporte la configuration des scénarii et le développement des modèles de réseau. Trois niveaux hiérarchiques sont définis pour la configuration : le niveau réseau qui crée la topologie du réseau à simuler, le niveau nœud qui définit le comportement du nœud et qui contrôle le passage des données entre les différents éléments fonctionnels à l'intérieur du nœud, et le niveau processus, qui décrit les protocoles qui sont représentés par des machines à état finis. Le code source est C/C++. L'analyse des données simulées est effectuée avec un ensemble de fonctions intégrées.

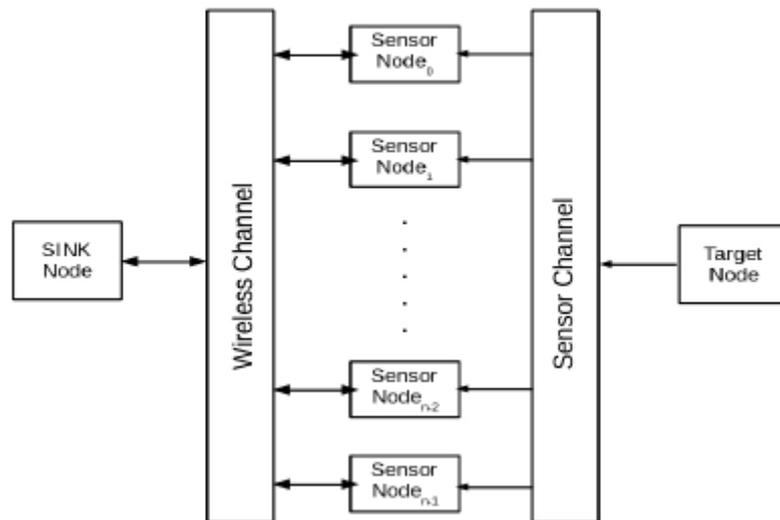
Le simulateur OPNET comporte plusieurs fonctionnalités adaptées et performantes pour la simulation des réseaux de capteurs.

### 4.3.3 Le Simulateur J-Sim

J-Sim, autrefois connu sous le nom de *JavaSim*, est un simulateur réalisé en *Java*. Il offre une bibliothèque de simulation de réseaux de capteurs et est conçu suivant une approche orientée composants. Son objectif étant la mise à disposition de composants réutilisables en informatique comme cela se fait déjà en électronique pour les circuits. Son architecture se subdivise en trois types de composants : un premier pour contenir la représentation des nœuds, un deuxième pour la représentation du canal de captage et un troisième pour la représentation du canal radio (voir Figure 4.2).

L'utilisation du langage *Java* pour la réalisation du moteur de simulation constitue un handicap pour la simulation des réseaux à grande échelle.

Enfin, comme dans NS-2, *J-Sim* propose que la description des scénarios se fasse par un langage de script, une extension du TCL pour *Java*, ce qui rend sa prise en main moins évidente. [ABD12]



**Figure4.2 :** Architecture générale de J-Sim

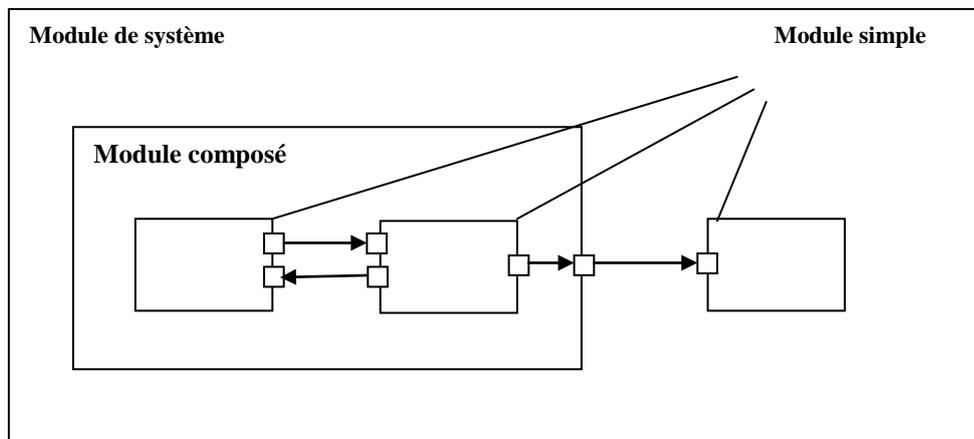
#### 4.3.4 Le Simulateur OMNET++

OMNET++ est un simulateur réseau à événements discrets. Il utilise une architecture orientée objet. Un modèle OMNET++ est une hiérarchie de modules. Un modèle de réseau est décrit en utilisant un langage d'interface appelé NED (Network Descriptor). Un module est une entité dans laquelle on peut définir des fonctionnalités. Un module peut être un nœud, un protocole, une couche, la zone de portée d'une onde radio (dans le cas de réseaux sans fil), etc.

Les modules peuvent avoir leurs propres paramètres. Ces paramètres peuvent être utilisés pour modifier les comportements du module et paramétrer la topologie du modèle. Les modules au plus bas niveau de la hiérarchie de module décrivent le comportement. Ces modules sont appelés modules simples et ils sont implémentés en C++ en utilisant la librairie de simulation. Les modules communiquent entre eux en se passant des messages. Les messages peuvent contenir des structures de données arbitrairement complexes.

Les modules simples peuvent envoyer des messages soit directement à leur destination soit en utilisant un chemin prédéfini en utilisant des portes et des connexions. Les portes sont les interfaces d'entrée et de sortie des modules. Une connexion (ou lien) est créée entre une porte de sortie et une porte d'entrée. Du fait de la structure hiérarchique du modèle, des messages peuvent traverser une série de connexions pour partir et arriver dans des modules simples.

Une telle série de connections d'un module simple vers un module simple est appelée une route. [JUL06]



**Figure 4.3:** Modules simples et composés

#### 4.3.5 Choix de simulateurs

Afin de pouvoir comparer plus facilement notre panel de simulateurs (NS2, OMNET++, OPNET, GloMoSim et J-sim), nous avons défini quelques points de comparaisons relatifs.

- Le passage à l'échelle des modèles (nombre de nœuds, nombre de flux simulables) ;
- La modélisation correcte des phénomènes physique dans les réseaux sans fil ;
- Le nombre de modèles fournis dans le simulateur ;
- La qualité des outils statistiques pour l'analyse des résultats;
- Les outils d'aide à la création de modèles, ainsi que les outils d'aide à la programmation de modèles ;
- La qualité des outils statistiques ;
- Flexible: capable de simuler des protocoles de réseau différents, les applications sous une large gamme de conditions de fonctionnement ;
- Clair: facile à identifier des problèmes de modélisation et des fautes de simulation
- La plateforme d'exécution: caractérise la machine abstraite sur la (les) quel (les) l'outil est compatible (système d'exploitation et compilateur).
- La facilité d'utilisation: elle peut être évaluée par la présence ou la puissance d'outil de visualisation, de support de description de topologie, de support de débogage etc.

- Le type de licence : il définit, pour chaque entité (personne physique ou morale), comment se procurer d'une version de l'outil en toute légalité.
  - Richesse: Exprime la disponibilité de protocoles (conçus pour différents niveaux du modèle de référence) ou de modèles déjà valides au sein de la communauté scientifique.
- [MON06]

<b>Simulateurs</b>	<b>J-SIM</b>	<b>NS-2</b>	<b>OMNet++</b>	<b>OPNet</b>
<b>Architecture</b>	Orienté composant	Orienté Objet	orienté composant	Orienté Objet
<b>Utilisation</b>	-	Difficile	facile	Facile
<b>Mobilité</b>	Oui	Oui	Oui	Oui
<b>Documentation</b>	Très difficile d'en trouver	Très bonne documentation	bonne	Bonne
<b>Interface</b>	Java	C++/OTCL	C++	C
<b>Licence</b>	Gratuit	Gratuit	Gratuit pour les universitaires Et pour toute utilisation non lucrative	Commercial & Gratuit pour les universitaires
<b>Plate-forme</b>	Java	Windows UNIX (Linux Solaris)	Windows (Cygwin) Unix	Windows Solaris

**Tableau4.1** : Comparaison entre les simulateurs.

Après avoir recueilli les informations nécessaires, nous avons pu dresser un tableau comparatif. Il en résulte que NS2 reste sans nul doute le simulateur le plus documenté et le plus polyvalent. Seul défaut: sa maniabilité et sa prise en main difficile. En le comparant à OMNET et OPNET, on remarque que ces simulateurs se valent à la différence que la prise en main d'OMNet++ et OPNET est largement plus facile (présence d'une interface graphique).

La documentation peut cependant sembler assez légère. J-sim est celui le plus à plaindre quand à la documentation: très difficile d'en trouver. C'est ce qui explique le manque de certitude lors de l'évaluation de ce simulateur. On sait toutefois qu'il est très performant (ce qui est du au moteur codé en Java).

Nous avons opté dans notre cas pour OMNET grâce à son architecture modulaire des composants entièrement paramétrables et parce qu'il présente une plateforme de simulation fournissant l'environnement nécessaire à la simulation de protocoles réseaux. Les principales possibilités de cette plateforme sont :

- Une architecture modulaire avec des composants entièrement paramétrables, réutilisables et assemblés de façon hiérarchique grâce au langage NED. Cette architecture permet non seulement de développer à partir de modules de bases de nouveaux modèles très facilement, mais de créer n'importe quel type de simulation sans aucune restriction.
- des possibilités de débogage avancées qui peuvent être notamment utiles à des fins pédagogiques.
- des facilités d'utilisation et d'exploitation des résultats grâce à des outils permettant de créer des fichiers facilement récupérables pour d'autres applications.

Une des limites d'OMNet++ vient notamment du fait qu'il soit à évènement discret et non en temps réel. Il est incapable de simuler plusieurs évènements à la fois, ce qui peut parfois être une limite car on ne peut pas observer le véritable comportement du réseau.

## Plateforme de Simulation

La plateforme de simulation est illustrée par la figure suivante :

### Sensor Network



**Figure4.4** : plateforme de simulation

#### **4.4 Modèle énergétique**

La consommation d'énergie est très importante car les capteurs sont généralement déployés dans des zones inaccessibles .Il est difficile, voire impossible, de remplacer les piles si toute l'énergie a été consommée. Ainsi, le niveau d'énergie du capteur a une grande influence sur la durée de vie du réseau. L'énergie consommée par un capteur est due à la capture, au traitement (la commutation de l'énergie et les fuites d'énergie) et à la

communication (l'énergie de transmission et l'énergie de réception). Ainsi, l'énergie consommée est en fonction du temps de transmission, de réception, d'inactivité et du mode veille.

#### 4.4.1 Energie consommée pour une réception

La consommation d'énergie est un paramètre déterminant dans les réseaux de capteurs sans fil. Les communications (transmission/réception) doit être contrôlée afin de prolonger la durée de vie des capteurs au sein du réseau. Pour recevoir un message de  $l$  bits, le récepteur consomme :

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-elec}(l) = lE_{elec}$$

Où :

$E_{Rx-elec}$  : L'énergie électronique de la réception

#### 4.4.2 Energie consommée pour une transmission

L'émission d'un signal est caractérisée par sa puissance ; quand la puissance d'émission est élevée, le signal aura une grande portée et l'énergie consommée sera plus élevée. Notons que l'énergie de communication représente la portion la plus grande de l'énergie consommée par un nœud capteur.

Pour émettre un message de  $l$  bits vers un récepteur loin de  $d$  mètres, l'émetteur consomme :

$$E_{Tx} = lE_{elec} + l\varepsilon_{mp} d^4$$

Où :

$E_{elec}$  L'énergie électronique radio et  $\varepsilon_{mp}$  est l'énergie de l'amplificateur de transmission. de même l'énergie dépensé lors de l'envoi de  $l$ -bit message à travers une petite distance est donnée par

$$E_{Tx} = lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2$$

Où :

$\epsilon_{fs}$  est l'énergie de l'amplificateur de transmission Pour un model libre (free-space).

#### 4.4.3 Energie consommée pour l'agrégation

Chaque Cluster Head collecte des paquets des données de chaque membre puis il procède à leurs agrégation et envoie le paquet agrégé vers la station de base (en un saut de communication) ce processus est répété par les CHs à chaque rond.

Lors de la simulation, on a fixé l'énergie d'agrégation à 0.0005 MJ pour 1bit ( $E_{Ag}$  1bit) de données. L'énergie consommée par une agrégation d'un paquet est donc obtenue en multipliant cette valeur par la taille de ce paquet ( $l_{data}$ ) en bits:

$$E_{DA} = l_{data} * E_{Ag} \quad 1bit$$

#### 4.5 Critères de performance.

Pour quantifier les performances de protocoles LEACH et les trois (3) protocoles cités dans le chapitre3, deux métriques sont sélectionnées: moyenne d'énergie consommée, et l'écart type. Ces métriques sont affectées par des facteurs comme le nombre de nœuds utilisés dans la simulation, le temps de simulation...etc.

##### 4.5.1 Moyenne d'énergie consommée

La moyenne de l'énergie consommée est en fonction de l'énergie consommée par chaque nœud et le nombre de nœuds. Elle est calculée comme suit:

$$AvgEnergySpent = totalEnergySpent / (numberOfNodes - 1);$$

Sachons que :

L'énergie totale consommée est obtenue par :

$$Total_{EnergySpent} = \sum_{i=1}^n E_i$$

Où :

$E_i$  est l'énergie consommée pour un capteur  $i$ . Elle représente la différence entre l'énergie initiale et son énergie résiduelle. et  $n$  est le nombre des nœuds de réseaux.

Le tableau suivant représente le résultat de notre simulation pour la moyenne d'énergie consommée.

Energie moyenne consommée				
Protocoles Nombre de Nœuds	LEACH	LEACH- E	DEEP	LEACH-V (variante)
25	56.6217	51.2999	52.8228	54.5671
50	83.8984	78.9258	74.6826	77.1343
75	106.211	83.2351	83.4987	85.8304
100	119.608	100.191	97.2329	98.9664
125	130.455	117.395	118.957	110.624
150	137.396	136.401	136.94	134.315

**Tableau4.2** : Moyenne d'énergie consommée

#### 4.5.2 Ecart type de l'énergie consommée

Ecart type de l'énergie consommée est obtenue par

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (AES_i - ES_i)^2}$$

Où :

$AES_i$  est l'énergie moyenne consommée par un capteur  $i$ , et  $ES_i$  est l'énergie consommée par un capteur  $i$ .

Le tableau suivant représentel'écart typed'énergie consommée :

Ecart type de l'énergie consommée				
Protocoles Nombre de noeuds	LEACH	LEACH-E	DEEP	LEACH (variante)
25	19.0163	15.9163	14.623	17.5147
50	23.1448	20.8977	18.1318	19.9139
75	25.016	16.5945	17.5721	17.6004
100	29.8801	18.347	16.2047	17.5252
125	25.6811	16.8878	17.0744	16.5046
150	28.857	19.2332	19.9675	19.9701

**Tableau4.3:**Ecart type de l'énergie consommée

#### 4.6 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation utilisés pour analyser les performances des différents protocoles de routage sont listés dans le tableau suivant :

Paramètres	Valeurs
Surface de simulation	100*100(m,m)
Localisation de la station de base	(0,0)
Nombre de nœuds	25,50,75,100,125,150
Energie initiale	100 000MJ
Durée de la simulation (seconde)	1000s
Nombre de station de base	1
Période d'un round	20s

**Tableau4.4** : paramètres de simulation sous OMNET++.

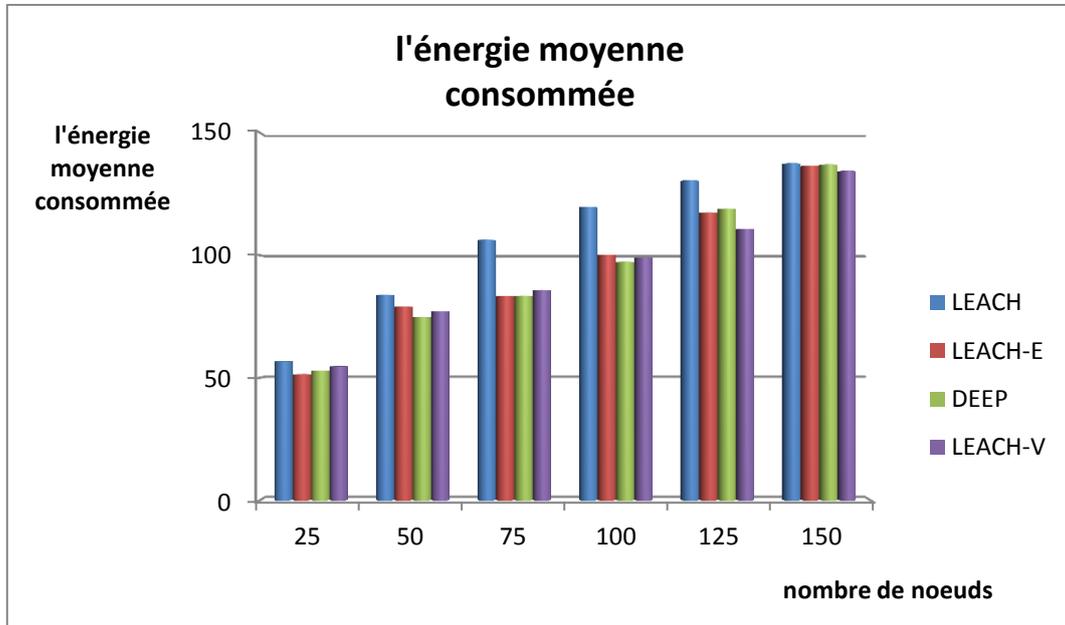
La simulation se déroulera de la manière suivante :

- Six topologies de réseau ont été utilisé lors de la simulation (25,50, 75, 100, 125, 150) et le déploiement des nœuds est aléatoire.
- Les quatre protocoles (LEACH, LEACH-E, LEACH-V et DEEP) ont été simulés sur les mêmes topologies définies au préalable.
- Pour le protocole LEACH, le nombre optimal de clusters étant une valeur empirique ne change pas en fonction des nœuds.
- Pour les autres protocoles, on a calculé le nombre optimal de clusters pour chaque topologie.
- Les nœuds capteurs sont supposés statiques ce qui le cas de nombreux RCSF.
- Le réseau est constitué d'un ensemble de nœuds homogènes et à capacité égale (même énergie initiale, même capacité de stockage et de traitement de données).

Sur la figure 4.5, on observe l'évolution de la moyenne d'énergie consommée en fonction du nombre de nœuds. Ceci est attendu car l'augmentation du nombre de nœuds dans le réseau provoque plus de messages échangés entre ces nœuds et consomme ainsi plus d'énergie dans la communication.

Dans la plupart des topologies l'énergie consommée par le protocole LEACH est plus importante que l'énergie consommée par chacun des trois protocoles (LEACH-E, DEEP et LEACH-V). Ceci est dû au fait que le protocole LEACH fixe le nombre optimal de clusters à 5%. Cette valeur est obtenue après plusieurs simulations et n'est pas calculable selon un modèle théorique. Par conséquent, ce pourcentage fixé ne peut être optimal que dans certaines conditions. Par contre le nombre optimal de clusters dans les trois autres protocoles, est calculable et varie en fonction du nombre de nœuds.

Dans le même graphe, nous remarquons que, l'énergie consommée par le protocole LEACH-E et DEEP est presque similaire tout en variant le nombre de nœuds du réseau. Avec les topologies de 125 et 150 nœuds, le protocole LEACH-E consomme légèrement moins d'énergie (en moyenne) que le protocole DEEP. Ceci revient aux paramètres introduits par ces deux protocoles dans le calcul du nombre optimal de cluster qui sont pratiquement les mêmes (la distance de CH à la station de base, le nombre de nœuds, la taille de champ de simulation), à l'exception de l'énergie d'agrégation prise en compte uniquement par le protocole DEEP. En revanche le protocole LEACH-V consomme légèrement plus d'énergie que LEACH-E et DEEP. A partir de 125 et 150 nœuds, ce protocole consomme moins d'énergie que les deux autres protocoles. Cette différence est due au fait que la formule de calcul du nombre optimal de clusters donnée par LEACH-V prend en considération la taille des paquets de données et du contrôle (en plus de la distance, le nombre de nœuds et la taille du réseau). Avec une topologie de 25, 50 et 75 nœuds, le nombre optimal de clusters du protocole LEACH-V est très petit ce qui explique l'énergie moyenne consommée. Avec une topologie de 125 et 150 nœuds l'énergie consommée par le protocole LEACH-V est la plus petite par rapport au protocole LEACH-E et DEEP car dans ce cas le nombre optimal est moyen.

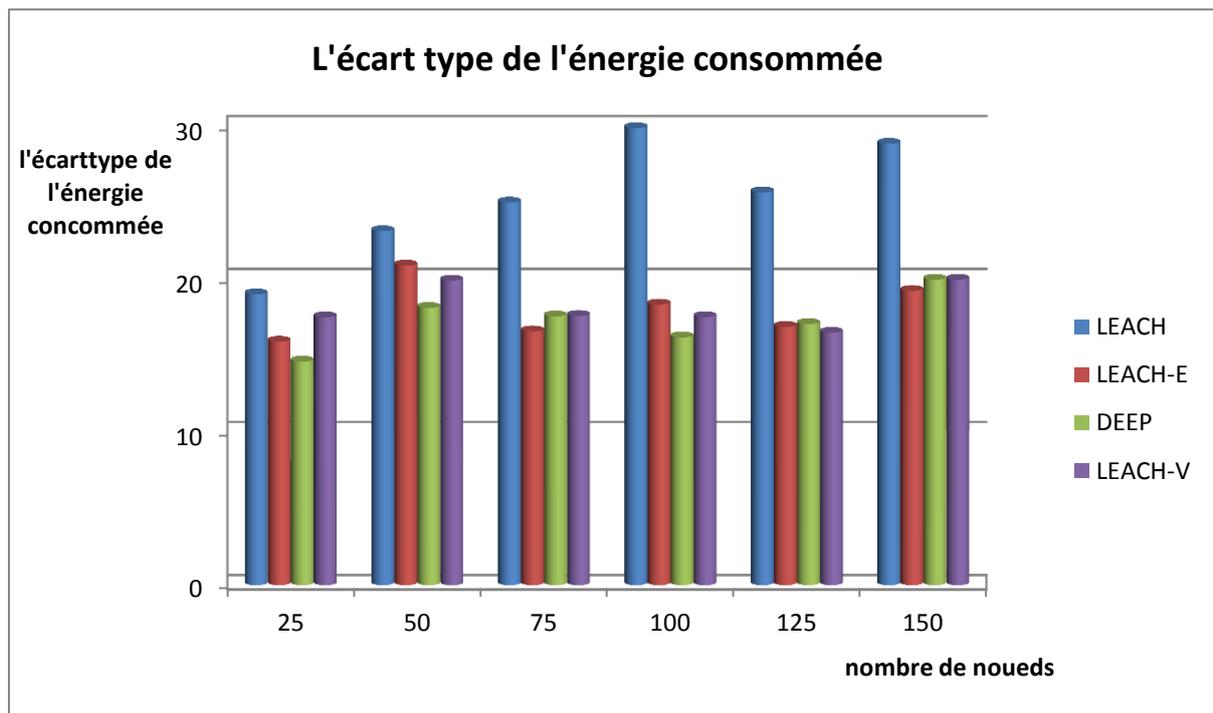


**Figure4.5** : Energie moyenne consommée par LEACH, LEACH-E, DEEP, LEACH-V

La figure4.6 représente l'écart type de l'énergie consommée par les nœuds. L'écart type mesure la répartition de l'énergie consommée autour de la moyenne. Le nombre de clusters influe directement sur la répartition des tâches (la charge) entre les nœuds du réseau. Si le nombre de clusters est très petit, la charge se concentre sur le cluster Head lors de l'agrégation des paquets de données. Si le nombre est très grand, le nœud CH doit attendre beaucoup du temps pour arriver à collecter une donnée suffisante à agréger.

L'écart type de l'énergie consommée par le protocole Leach est très grand par rapport à celui constaté dans les autres protocoles, ce qui signifie que le 5% ne permis pas une répartition de charge équilibrée.

L'écart type enregistré pour les protocoles LEACH-E LEACH-V et DEEP presque similaire. A une topologie de 150 nœuds, l'écart type de l'énergie consommée par LEACH-E est légèrement inférieur à celui de DEEP et LEACH-V.



**Figure4.6** : l'écart type de l'énergie consommée.

#### 4.7 Synthèse

Les résultats de notre simulation ont montré qu'un nombre de clusters peut être optimal dans certains scénarios, et moins optimal dans d'autres. Cependant, cette valeur ne peut pas être une valeur empirique comme cité dans LEACH, mais elle doit être calculée. Elle dépend d'un nombre de paramètres, tel que le nombre de nœuds, la taille de réseau et la taille des paquets.

Le nombre optimal calculé par le protocole LEACH-E dépend essentiellement du nombre de nœuds et de la surface du réseau. La distance moyenne entre un nœud CH et la station de base est calculée par une variable aléatoire du poisson. Elle est estimée à 0.765 en considérant que la station de base se situe au centre du carré (le champ de simulation). De plus le nombre des membres d'un cluster est aussi une variable aléatoire contrairement aux

deux autres protocoles qui considèrent ce nombre comme le rapport entre le nombre total des nœuds du réseau et le nombre de clusters. la moyenne de l'énergie consommée par ce protocole est inférieure à celle de DEEP quand le nombre de nœuds est supérieur à 125. La répartition de charge de LEACH-E est meilleure que ce dernier.

Le nombre optimal calculé par le protocole DEEP dépend aussi essentiellement du nombre de nœuds du réseau et la taille de champ, ainsi que la distance de CH à la station de base, cette dernière est inclus dans un intervalle qui a comme borne inférieure le seuil de la distance (la distance minimale) et comme borne supérieure la distance maximale qui équivaut à la diagonale du champ ( $c\sqrt{2}$  ou  $c$  est le côté du carré).

Contrairement aux deux protocoles précédents, le protocole LEACH-V a pris en compte l'énergie consommée lors de la phase d'organisation en clusters (set-up phase de LEACH), de ce fait la formule qui calcul le nombre optimal inclus la taille des paquets du contrôle et de données (en plus des paramètres cités précédemment).

## Conclusion générale

Contrairement aux réseaux traditionnels qui se préoccupent de garantir une bonne qualité de service, les réseaux de capteurs doivent, en plus, donner de l'importance à la conservation d'énergie. Ils doivent intégrer des mécanismes qui permettent aux utilisateurs de prolonger la durée de vie du réseau en entier, car chaque nœud est alimenté par une source d'énergie limitée et généralement irremplaçable.

Dans un nœud capteur, l'énergie est consommée en assurant les fonctions suivantes : la capture, le calcul (traitement) et la communication. Plusieurs facteurs interviennent dans ces fonctions : l'état du module radio, la politique d'accès au canal de transmission, le protocole de routage etc. Pour maîtriser l'effet de ces facteurs sur la consommation énergétique, la communauté de recherche est en train de développer et de raffiner plusieurs techniques de conservation d'énergie.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressées aux méthodes théoriques calculant le nombre optimal de clusters optimisant l'énergie. On a étudié 3 travaux qui proposent le calcul de ce dernier.

En utilisant le protocole LEACH, et après plusieurs simulations nous avons pu collecter plusieurs résultats qui nous ont permis de déduire dans cette application le nombre le plus optimale de clusters.

La réalisation de notre travail nous a permis de :

**Découvrir** le monde des RCSFs, connaître leurs caractéristiques et les classes des protocoles de routage proposées pour ces réseaux.

**Etudier** le fonctionnement détaillé du protocole LEACH et acquérir de bonnes connaissances sur un simulateur très puissant, grâce à son architecture modulaire des composants entièrement paramétrables et une plateforme de simulation fournissant l'environnement nécessaire à la simulation de protocoles réseaux et à ses nombreuses bibliothèques, il est très utilisé dans le monde des recherches sur les réseaux et même recommandés par beaucoup de chercheurs. Nous avons surtout pu nous familiariser avec ce logiciel et découvrir nous même certaines de ses fonctionnalités malgré sa complexité et ses nombreuses possibilités de paramétrages.

Nous envisageons comme perspectives, d'étendre notre étude sur diverses approches relatives à notre thématique, afin d'élaborer notre propre modèle mathématique qui calcul le nombre optimal de clusters, optimisant l'énergie.

## Références

1. **[ABD 08]** Abdallah Makhoul «Réseaux De Capteurs : Localisation, Couverture Et Fusion De Données», thèse doctorat, Université De Franche-Comté, 14 novembre 2008, p16.
2. **[ABD 12]** Abdoulaye BERTHE, « Modélisation et Simulation de Réseaux Locaux et Personnels sans fil : Intégration des Couches PHY et MAC », thèse doctorat, janvier 2012, p20.
3. **[ADJ 05]** C. Adjih, P. Jacquet, and L. Viennot. Computing connected dominated sets with multipoint relays. *Ad Hoc & Sensor Wireless Networks*, 1(1-2) :27–39, 2005.
4. **[AHM 11]** Ahmed ZOUINKHI «Contribution A La Modélisation De Produit Actif Communicant, Spécification Et Evaluation D'un Protocole De Communication Orienté Sécurité Des Produits», thèse doctorat, Université Nancy, 07/04/2011, p117-118.
5. **[AKY 01]** I.F. AKYILDIZ, Weilian. SU, Yogesh Sankarasubramaniam and Erdal CAYIRCI, « Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks* 38 », pp. 393–422, 2001
6. **[AKY 02]** J. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. I. Cayirci. "Wireless sensor networks : A survey". *IEEE Computer Networks*, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422, March 2002.
7. **[BAI 11]** Bai Chen, Yaxiao Zhang, Yuxian Li, Xiaochen Hao, Yan Fang, « A Clustering Algorithm of Cluster-head Optimization for Wireless Sensor Networks Based on Energy», Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China Qinhuangdao Institute of Technology, Qinhuangdao 066004, China, *Journal of Information & Computational Science* 8: 11 (2011) 2129–2136.
8. **[BEC 09]** Walid BECHKIT, « Un nouveau protocole de routage avec conservation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Supérieure d'Informatique ESI, Juin 2009.

9. **[BAH 10]** Bahnes Nacera, « gestion et supervision d'un réseau de capteur sans fil à l'aide d'un protocole à économie d'énergie WSN-SNMP » mémoire magistère, université d'Oran.
10. **[BEN 09]** Djawhara BENCHAIRA, Ahlem BENCHEIKH, «Sécurité de la dissémination de données dans un réseau de capteurs sans fil : cas du protocole Tiny diffusion », Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Supérieure d'Informatique ESI, Algérie, 2009 ;
11. **[BEN 13]** Benoît Rivollet et Claude-Emmanuel Serre, « Note De Veille-CAPTIVEN», Tech2Market, [www.tech2market.fr](http://www.tech2market.fr); [www.captiven.fr](http://www.captiven.fr),2013.
12. **[CHE 04]**: Cheung Coleri S and Varaiya P, Sensor networks for monitoring trafic, 42nd Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 2004.
13. **[CLI 05]** C.Li, M.Ye, G.Chen, J.Wu "An Energy-Efficient Unequal Clustering Mechanism for Wireless Sensor Networks, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, December 2005.
14. **[EST 02]**: Estrin Deborah [et al.], Connecting the physical world with pervasive networks, IEEE Pervasive Computing, 2002, VOL. 1(1), pp. 59-69.
15. **[HAC 03]** A. HAC, « Wireless Sensor Network Designs», Edition: John Wiley & Sons Ltd, 2003.
16. **[HAM 07]** A. HAMZI, « Plateforme pour l'aide à la conception et à la simulation des réseaux sans fil », mémoire pour obtenir le grade de magister en informatique, Institut National de formation en Informatique, 2007.
17. **[HEI 00]** W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan "Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks", *IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.

18. **[HEN 10]** Hend Alqamzi & Tiffany Jing Li « A Distributed Topology Management Protocol for Wireless Sensor Networks », **1. Electrical Engineering Department The UAE University Al Ain, United Arab Emirates, Department of Electrical and Computer Engineering Lehigh University Bethlehem, PA 18015, 2010.**
19. **[HON 09]** Hong Li, Xu Shunjie, Li Shurong, Zou Weixia, Zhou Zheng, « Novel Method for Optimal Number of Cluster Heads in LEACH », **1. College of computer and Communication Engineering, China University of Petroleum 257061, 2. Beijing University of Posts and Telecommunications Beijing, 100876, 2009.**
20. **[JOH 06]** John Paul Walters, Zhengqiang Liang, Weisong Shi, et Vipin Chaudhary, « Wireless Sensor Network Security: A Survey », Department of Computer Science Wayne State University, 2006.
21. **[JUL06]** Julien VAUDOUR, « Élaboration de couches MAC et réseau pour un réseau de capteurs », mémoire d'ingénieur, Institut National des Télécommunications Département Réseaux et Services de Télécommunications Laboratoire SAMOVAR - UMR 5157 CNRS, p29.
22. **[LU 07]** J. L. Lu, F. Valois, and D. Barthel. Low-energy self-organization scheme for wireless ad hoc sensor networks. In Proceedings of the 4th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, WONS07, pages 138–145, Obergurgl, Tyrol, Austria, 2007.
23. **[LI 05]** N. Li, J. C. Hou, and L. Sha. Design and analysis of an mst-based topology control algorithm. IEEE Transactions on Wireless Communications, 4(3) :1195–1206, 2005.
24. **[MAN 03]** Manjeshwar, Arati and Agrawal, Dharma P. APTEEN: A Hybrid Protocol for Efficient Routing and Comprehensive Information Retrieval in Wireless Sensor Networks. IPDPS '02, 16th International Parallel and Distributed Processing Symposium. 2003, p. 48.

25. [MEY 02] M. Ye, C. Li, G. Chen, and J. Wu, "EECS: An Energy Efficient Clustering Scheme in Wireless Sensor Networks", National Laboratory of Novel Software Technology, Nanjing University, China 2002.
26. [MHA 04] V. Mhatre, and C. Rosenberg. Design guidelines for wireless sensor networks: communication, clustering and aggregation. *Ad Hoc Networks Journal*, vol.2, no.1, pp.45-63, 2004.
27. [MUR 05] S. D. Muruganathan, D. C. F. Ma, R. I. Bhasin, and A. O. Fapojuwo, "A Centralized Energy-Efficient Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *IEEE Radio communications*, 2005.
28. [PEN 02] W. Peng-Jun, K. M. Alzoubi, and O. Frieder. Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks. In Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, INFOCOM02, pages 1597–1604, New York, USA, 2002.
29. [PUJ 05] Pujolle G., « Les réseaux Editions 2005 », éditions Eyrolles, 2005. <http://www.epfl.ch>, site de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, Septembre 2005.
30. [POM 04] C. POMALAZA-REZ, « Wireless Ad Hoc & Sensor Networks», University of Oulu, Finland, 2004.
31. [QAY 02] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti. Multipoint relaying for flooding broadcast messages in mobile wireless networks. In Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, HICSS02, pages 3866–3875, Hawaii, USA, 2002.
32. [RAG 02] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park, and M. B. Srivastava, "Energy-aware wireless microsensor networks". *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 19, No. 2, March 2002, pp.40-50.
33. [RAJ 11] Rajashree.V.Biradar, Dr. S. R. Sawant Dr. R. R. Mudholkar Dr. V. C « Multihop Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks ». Patil Department of

Information Science and Engineering, Ballari Institute of Technology and Management, Bellary, Department of Electronics, Shivaji University, Kolhapur, Maharashtra, India.

34. **[ROM12]** ROMDHANI Bilel « Exploitation De L'hétérogénéité Des Réseaux De Capteurs Et D'actionneurs Dans La Conception Des Protocoles D'auto-Organisation Et De Routage », Thèse doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Ecole doctorale : Informatique et Mathématiques de Lyon, 18 07 2012, p21-28.
35. **[TOU 80]** G. T. Toussaint. The relative neighborhood graph of a finite planar set. *Pattern Recognition*, 12(4) :261–268, 1980.
36. **[VIS04]** S.C. VISWESWARA, «An Automatic, Adaptive, ad-hoc Algorithm for Power Conservation in Sensor Networks using Switch-off », Master's Thesis, department of computer science, faculty of North Carolina State University, July 2004.
37. **[VAU 04]** Vaulx, J.-J. Li, P. Chainais, R. Aufrère, A. Amamra, J.-P. Chanet Remote Continuous Cardiac Arrhythmias Detection and Monitoring Transformation of Healthcare with Information Technologies, *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 105, IOS Press, pp. 112-120, 2004.
38. **[WAN 09]** Y. Wang , B. Ramamurthy, X. Zou , and Y. Xue “An efficient scheme for removing compromised sensor nodes from wireless sensor networks,”*Journal of Security and Communication Networks*, 2009.
39. **[Wu 03]** J. Wu and F. Dai. Distributed dominant pruning in ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, ICC03*, pages 353–357, Alaska, USA, 2003.
40. **[Xue et al.10]** XUE Yong, AGUILAR Andres, GONZALEZ Andres, BARROUX Mickaël, « Agrégation de données dans les réseaux de capteurs », projet SR04(rapport final), université technologie Compiègne,10/2010.

41. **[YOU 04]** O. YOUNIS, S. FAHMY, “HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks” , IEEE Transactions on Mobil Computing, vol. 3, no. 4, pp.366-379, 2004.
42. **[ZHE 04]** Zheng J., Myung L., « Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality », The city college of CUNY, IEEE Communications Magazine, juin 2004.